



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; *Reynolds number*
 $= 9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$
; $0,5$ ”

LINA ‘AINUN NAFI’AH
NRP 02111440000052

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM 141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”

**LINA ‘AINUN NAFI’AH
NRP 02111440000052**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]



FINAL PROJECT - TM 141585

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECT OF DISTURBANCE CYLINDER AGAINST TO THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Study Case for Variation $d/D = 0.5$; $S/D = 1.4$; *Reynolds number* = 9.7×10^4 ; 14.5×10^4 ; 17.8×10^4 ; with $y/D = 0.0$; 0.25 ; 0.5 ”

LINA 'AINUN NAFI'AH
NRP 02111440000052

Supervisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; *Reynolds number* =
 $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

LINA 'AINUN NAFI'AH

NRP. 02111440000052

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., PhD (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T (Penguji II)
NIP. 197104051997021001
4. Vivien Suphandani, S.T., M.E., PhD (Penguji III)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA

JULI, 2018

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; *Reynolds number* =
 $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$;
dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”

Nama Mahasiswa : Lina ‘Ainun Nafi’ah
NRP : 02111440000052
Departemen : Teknik Mesin FTI- ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Energi fosil merupakan sumber energi utama yang digunakan di Indonesia. Seiring dengan berjalannya waktu, ketersediaan energi fosil sangat terbatas, maka perlu adanya sumber energi terbarukan untuk menghindari krisis energi di masa mendatang. Salah satu sumber energi terbarukan adalah energi angin. Pemanfaatan energi angin yang dapat dilakukan adalah dengan turbin angin sebagai pembangkit listrik tenaga angin. Turbin angin yang memadai untuk kondisi angin di Indonesia adalah turbin angin Savonius. Prinsip kerja dari turbin angin Savonius adalah memanfaatkan aliran fluida yang bergerak dengan kecepatan tertentu, sehingga menimbulkan gaya drag pada sudu-sudu turbin. Turbin angin Savonius merupakan turbin dengan efisiensi terendah, oleh sebab itu perlu dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu di depan returning blade.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan axial fan sebagai sumber energi angin. Benda uji berupa turbin angin Savonius dua sudu dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm, tinggi (H) = 294,4 mm, diameter turbin (L) = 303,4 mm, diameter poros (e) = 19 mm, dan diameter end plate

$(D_0) = 321 \text{ mm}$. Untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius, maka ditempatkan sebuah silinder pengganggu dengan diameter $(d) = 88,8 \text{ mm}$ dan tinggi $(t) = 500 \text{ mm}$ di depan returning blade untuk mengurangi gaya hambat yang terjadi. Penelitian ini dilakukan dengan jarak $S/D = 1,4$, variasi Reynolds number $= 9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$, dan dengan variasi posisi $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$. Untuk pengukuran kecepatan aliran angin digunakan anemometer, pengukuran torsi statis digunakan torque meter, pengukuran torsi dinamis digunakan brake dynamometer, dan pengukuran kecepatan poros digunakan tachometer. Dari putaran dan torsi dinamis ini, nantinya akan diperoleh berapa besar daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah bahwa penempatan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di depan returning blade dengan jarak $S/D = 1,4$ dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius, pada posisi $y/D = 0,5$ dan Reynolds number $= 9,7 \times 10^4$. Hal ini ditandai dengan meningkatnya putaran turbin dengan kenaikan sebesar 1,08 kali dari putaran turbin tanpa silinder pengganggu, coefficient of power memiliki kenaikan 1,09 kali dari coefficient of power turbin tanpa silinder pengganggu, coefficient of moment memiliki kenaikan 1,17 kali dari coefficient of moment turbin tanpa silinder pengganggu, dan kemampuan self starting dari turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu lebih baik dari turbin tanpa silinder pengganggu pada semua posisi sudut ($0^\circ - 180^\circ$).

Kata kunci : *Coefficient of moment, coefficient of power, perbandingan jarak S/D , perbandingan posisi y/D , putaran turbin, Reynolds number, silinder pengganggu, turbin angin Savonius.*

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECT OF DISTURBANCE CYLINDER AGAINST TO THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Study Case for Variation $d/D = 0.5$; $S/D = 1.4$; *Reynolds number*
 $= 9.7 \times 10^4$; 14.5×10^4 ; 17.8×10^4 ; with $y/D = 0.0$; 0.25 ; 0.5 ”

Student's name : Lina ‘Ainun Nafi’ah
NRP : 02111440000052
Department : Mechanical Engineering FTI- ITS
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Fossil energy is the main energy source used in Indonesia. With the passage of time, the availability of fossil energy is very limited, so there is need for a renewable energy sources to avoid the future energy crises. One of renewable energy source is wind energy. Utilization of wind energy that can be do is to use wind turbine as wind power plant. An adequate wind turbine for wind conditions in Indonesia is Savonius wind turbine. The working principle of Savonius wind turbine is to utilize a fluid flow that travels at a certain speed, giving rise to a drag force on the turbine blades. The Savonius wind turbine is the lowest efficiency turbine, therefore research needs to improve the performance of Savonius wind turbine by placing a disturbance cylinder in front of returning blade of the turbine.

This research was conducted experimentally using axial fan as a source of wind energy. The test object is a Savonius wind turbine with two blades having a diameter of a turbine blade (D) = 165.2 mm, height of turbine (H) = 294.4 mm, diameter of turbine (L) = 303.4 mm, diameter of shaft (e) = 19 mm, and the diameter of the end plate (D_0) = 321 mm. To improve the performance of Savonius wind turbine, by placing a disturbance cylinder with a diameter (d) = 88.8 mm and height (t) = 500 mm in front of

returning blade of the turbine to reduce the drag force. This research was do with distance of $S/D = 1.4$, variation of Reynolds number = 9.7×10^4 , 14.5×10^4 , and 17.8×10^4 , and with variation of position $y/D = 0.0$; 0.25 ; 0.5 . For wind speed measurement using anemometer, static torque measurement using torque meter, dynamic torque measurement using brake dynamometer, and shaft speed measurement using tachometer. From this rotation and dynamic torque, will be obtained how much power generated by Savonius wind turbine.

The result of this research shows that by placing the disturbance cylinder $d/D = 0.5$ in front of returning blade of the turbine with distance $S/D = 1.4$ can improve the performance of Savonius wind turbine at position $y/D = 0.5$ and Reynolds number = $9,7 \times 10^4$. This is proved by an increase in turbine rotation, coefficient of power, and coefficient of moment which are of increase 1.08 times, 1.09 times, and 1.17 times respectively compared with that of conventional Savonius wind turbine. The self-starting ability of the turbine with the disturbance cylinder is better than the conventional one.

Keywords: Coefficient of moment, coefficient of power, disturbance cylinder, Reynolds number, Savonius wind turbine, S/D distance ratio, turbine rotation, y/D position ratio.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir dengan judul **Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius** “Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; dan $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ” ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik karena bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya yang diberikan kepada penulis.
2. Orang tua penulis, Bapak Zainal Arifin dan Ibu Purwaningsih atas segala doa, kasih sayang, semangat, dukungan, dan bantuan agar penulis dapat segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Adik penulis, Muhammad ‘Irfan Sholahuddin yang selalu memberikan dukungan, semangat dan doa agar penulis dapat segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah mencurahkan ilmu, perhatian, waktu, tenaga, selalu memberikan bimbingan, arahan serta menjadi panutan bagi penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
5. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD, Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, dan Vivien Suphandani, ST, ME, PhD, selaku dosen penguji seminar proposal dan sidang Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan untuk perbaikan Tugas Akhir ini.

6. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., selaku dosen wali penulis yang telah banyak memberikan perhatian, pelajaran, waktu, tenaga dan masukan yang membangun hingga penulis mampu mengembangkan diri selama berkuliah di ITS.
7. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak sekali bantuan selama penulis menuntut ilmu di ITS baik dalam bidang akademik maupun non akademik.
8. Elin Fitrianingsih, Sri Purwandari dan Arcana Ardhiana Aprilia teman baik penulis sejak SMA hingga seterusnya yang selalu menghibur penulis dan mendukung penulis.
9. Kartika Firdausi, Maslakhatuz Zahro, Arinda Cria Shanta, Bima Ali' Tamara, Kania Amelia Safitri, Syaldiles Putri Indahdinata, Dina Andriyani, dan Deajeng Prameswari teman penulis yang selalu menghibur dan menemani penulis dalam keseharian.
10. Tim Savonius kelompok 4, Elsa, Eka, Jasmi, Ayup, Clarissa, Meika, Riri, Vita, Ammar, mas Yudhis dan mas Andri yang bersama-sama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan perkuliahan S1 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan keterbatasan yang terdapat dalam penulisan Tugas Akhir ini. Sehingga penulis sangat mengharapkan segala bentuk kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak pada umumnya dan khususnya bagi penulis sendiri.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

HALAMAN PENGESAHAN

ABSTRAK.....vii

ABSTRACTix

KATA PENGANTARxi

DAFTAR ISI.....xiii

DAFTAR GAMBARxix

DAFTAR TABEL.....xxv

DAFTAR SIMBOLxxix

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Perumusan Masalah..... 5

1.3 Batasan Masalah..... 8

1.4 Tujuan Penelitian..... 9

1.5 Manfaat Penelitian..... 9

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 11

2.1 Energi Angin 11

2.2 Turbin Angin 13

2.2.1 *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)* 15

2.2.2 *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*..... 17

2.3 Turbin Angin Savonius 19

2.4 Gaya Drag 21

2.5 Perhitungan Torsi Statis 24

2.6 Bilangan Reynolds (*Reynolds Number*) 24

2.7	Perhitungan Daya	26
2.7.1	Perhitungan Daya Turbin Secara Teoritis.....	26
2.7.2	Perhitungan Daya Aktual Turbin.....	27
2.8	<i>Rope Brake Dynamometer</i>	27
2.9	<i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	29
2.10	<i>Coefficient of Power (CoP)</i> dan <i>Coefficient of moment</i>	30
2.11	Penelitian Terdahulu.....	32
2.11.1	Pengurangan Gaya <i>Drag</i> pada Silinder Sirkular dengan Menggunakan Silinder Pengganggu Tipe I.....	33
2.11.2	Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Plat Penghalang dan Plat Pengarah.....	36
2.11.3	Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengaruh Variasi Parameter Geometri dari Turbin Angin Savonius	39
2.11.4	Optimalisasi Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengganggu berupa Plat Datar di Depan <i>Returning Blade</i>	45
2.11.5	Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi <i>Returning Blade</i> Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius.....	48
2.11.6	Studi Eksperimen Pengaruh Lebar <i>Single Curtain</i> terhadap Performa Turbin Angin Savonius	52
2.11.7	Studi Numerik Pengaruh Lebar <i>Single Curtain</i> terhadap Performa Turbin Angin Savonius	54
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	57
3.1	Analisa Dimensi	57
3.1.1	Analisa Dimensi <i>Coefficient of power</i>	58

3.1.2	Analisa Dimensi <i>Coefficient of Moment</i>	61
3.2	Peralatan Eksperimen	63
3.2.1	Axial Fan	63
3.2.2	<i>Honeycomb</i>	65
3.2.3	Benda Uji.....	66
3.2.4	Penyangga Turbin Angin Savonius	68
3.2.5	Alat Ukur.....	69
3.2.6	<i>Voltage Regulator</i>	73
3.2.7	<i>Brake dynamometer</i>	74
3.2.8	Pelumas	76
3.3	Langkah Pengukuran	77
3.3.1	Prosedur Penelitian.....	77
3.3.1.1	Prosedur Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis.....	77
3.3.1.2	Prosedur Menentukan Torsi Statis.....	79
3.3.2	<i>Flowchart</i> Penelitian	81
3.3.2.1	<i>Flowchart</i> Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis	81
3.3.2.2	<i>Flowchart</i> Menentukan Torsi Statis	84
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		87
4.1	Data Penelitian dan Contoh Perhitungan.....	87
4.1.1	Perhitungan Bilangan Reynolds	87
4.2	Contoh Perhitungan	90
4.2.1	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	90
4.2.2	Perhitungan Besar Nilai Torsi Dinamis (Td).....	91
4.2.3	Perhitungan Nilai <i>Coefficient of power</i> (CoP).....	92

4.2.4	Perhitungan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm)...	92
4.3	Analisa Performa Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu.....	93
4.3.1	Analisa Nilai Putaran sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu.....	93
4.3.2	Analisa Nilai <i>Coefficient of power</i> sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu.....	95
4.3.3	Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu.....	97
4.3.4	Analisa Nilai Torsi Statis sebagai Fungsi Besar Posisi Angular Sudu pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu	99
4.4	Analisa Perbandingan Performa Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu	101
4.4.1	Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu	102
4.4.1.1	Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $y/D = 0,0$	102
4.4.1.2	Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $y/D = 0,25$	105
4.4.1.3	Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $y/D = 0,5$	108

4.4.2	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu	111
4.4.2.1	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$..	111
4.4.2.2	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$	114
4.4.2.3	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 17,8 \times 10^4$	117
4.4.3	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu	120
4.4.3.1	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$	120
4.4.3.2	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$	123
4.4.3.3	Analisa Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 17,8 \times 10^4$	126
4.4.4	Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu	129
4.4.4.1	Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$	129

4.4.4.2 Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$	132
4.4.4.3 Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 17,8 \times 10^4$	135
BAB V PENUTUP	139
5.1 Kesimpulan.....	139
5.2 Saran.....	140
DAFTAR PUSTAKA	141
LAMPIRAN	143
BIODATA PENULIS	165

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Laju Pertumbuhan Energi Angin Tahunan di Dunia (Daryanto, 2007)	12
Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal (<i>www.google.com</i>)	14
Gambar 2.3 Salah Satu Contoh Turbin Angin Sumbu Horizontal (<i>Triple Blades</i>).....	16
Gambar 2.4 Salah Satu Contoh Turbin Angin Sumbu Vertikal (Darrieus Turbine).....	18
Gambar 2.5 Turbin Angin Savonius	20
Gambar 2.6 Arah Aliran Angin Turbin Savonius	21
Gambar 2.7 Skema Sederhana Penguraian Gaya <i>Drag</i>	22
Gambar 2.8 Mekanisme <i>Rope Brake Dynamometer</i>	28
Gambar 2.10 Grafik Nilai <i>Coefficient of Power</i> sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Berbagai Turbin Angin	32
Gambar 2.11 Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> (Cp) pada Silinder Sirkular dengan Variasi Sudut Iris pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi, et al., 2009).....	34
Gambar 2.12 Variasi Sudut Potong Silinder Penghalang terhadap Perbandingan C_D/C_{D0} pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi, et al., 2009)	35
Gambar 2.13 Skema Susunan Pengganggu Turbin Angin Savonius (Altan, et al., 2008).....	37
Gambar 2.14 Grafik Pengaruh Variasi Panjang Plat Pengganggu terhadap Nilai <i>Power Coefficient</i> (CoP) (Altan, et al., 2008).....	37
Gambar 2.15 Grafik Pengaruh Putaran Turbin (n) terhadap Besar Sudut Plat (α dan β) pada <i>Curtain 1</i> (Altan, et al., 2008).....	38

Gambar 2.16 Grafik Pengaruh Nilai Torsi yang Dihasilkan (M) terhadap Putaran Turbin (n) ($\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$) (Altan, et al., 2008).....	39
Gambar 2.17 Skema Turbin Angin Savonius (Mahmoud, et al., 2010).....	40
Gambar 2.18 Hubungan antara <i>Coefficient of power</i> (CoP) dan Kecepatan Angin pada Turbin (Mahmoud, et al., 2010)	41
Gambar 2.19 Pengaruh Jumlah <i>Blade</i> pada <i>Power</i> Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)	41
Gambar 2.20 Pengaruh Jumlah <i>Stage</i> Turbin pada <i>Specific Power</i> terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010).....	42
Gambar 2.21 Pengaruh <i>Overlap Ratio</i> pada <i>Power</i> Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010).....	43
Gambar 2.22 Pengaruh <i>Aspect Ratio</i> pada <i>Coefficient of power</i> (CoP) terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)	44
Gambar 2.23 Pengaruh <i>End Plates</i> pada <i>Power</i> Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)	44
Gambar 2.24 Skema Susunan Plat Pengganggu pada Turbin Savonius Dua Sudu dan Tiga Sudu (Mohamed, et al., 2010).....	45
Gambar 2.25 Perbandingan Hasil Simulasi Struktur Aliran pada saat <i>Self Starting</i> dengan <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) = 0,7 (a) Turbin Angin Savonius Dua Sudu (b) Turbin Angin Savonius Tiga Sudu (Mohamed, et al., 2010)	46
Gambar 2.26 Grafik Performa Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu (a) Hubungan antara <i>Tip Speed Ratio</i> dan <i>Torque Coefficient</i> (b) Hubungan antara <i>Tip Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient</i> (CoP) (Mohamed, et al., 2010)	47
Gambar 2.27 Grafik Performa Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu (a) Hubungan antara <i>Tip Speed Ratio</i> dan <i>Torque Coefficient</i> (b) Hubungan antara <i>Tip Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient</i> (CoP) (Mohamed, et al., 2010)	47

Gambar 2.28 Grafik Perbandingan Putaran antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tapa Silinder Pengganggu (n/n_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Fernando, 2017).....	48
Gambar 2.29 Grafik Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tapa Silinder Pengganggu (T/T_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Fernando, 2017)	49
Gambar 2.30 Grafik <i>Coefficient of power</i> Turbin Angin Savonius Berpengganggu sebagai Fungsi Jarak pada $S/D=1,4 -2,4$ (Fernando, 2017)	50
Gambar 2.31 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of power</i> antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D=1,4 - 2,4$ (Fernando, 2017)	51
Gambar 2.32 Skema Penelitian (Yuwono, et al., 2018).....	53
Gambar 2.33 Perbandingan Turbin dengan Plat dan Turbin tanpa Plat terhadap Fungsi S/D , $Re = 3 \times 10^4$ dan 9×10^4 (a) Putaran (N/N_0) (b) <i>Coefficient of Power</i> (CoP/CoP_0) (c) Torsi Statis (TS/TS_0) (Yuwono, et al., 2018)	53
Gambar 2.34 Skema Pemodelan Domain (Yuwono, et al., 2018)	55
Gambar 2.35 Aliran Fluida di Sekitar Turbin Savonius Tanpa Plat, $Re = 3 \times 10^4$ (a) <i>Velocity Vector</i> (b) <i>Pressure Countur</i> dan $Re = 9 \times 10^4$ (c) <i>Velocity Vector</i> (d) <i>Pressure Countur</i> (Yuwono, et al., 2018).....	55
Gambar 2.36 Kontur Tekanan di Sekitar Turbin Savonius dengan Plat, $Re = 3 \times 10^4$ (a) $S/D = 1,00$ (b) $S/D = 1,02$ (c) $S/D = 1,03$ (d) $S/D = 1,15$ (e) $S/D = 1,41$ (f) $S/D = 2,0$ (Yuwono, et al., 2018) ..	56
Gambar 2.37 Kontur Tekanan di Sekitar Turbin Savonius dengan Plat, $Re = 9 \times 10^4$ (a) $S/D = 1,00$ (b) $S/D = 1,02$ (c) $S/D = 1,03$ (d) $S/D = 1,15$ (e) $S/D = 1,41$ (f) $S/D = 2,0$ (Yuwono, et al., 2018) ..	56

Gambar 3.1 Skema Penelitian dan Parameter Pengukuran.....	57
Gambar 3.2 <i>Axial Fan</i> CKE SPV-18	64
Gambar 3.3 Skema Susunan Peralatan Penelitian dan Dimensi Alat (dalam mm).....	65
Gambar 3.4 <i>Honeycomb</i> (dalam mm)	65
Gambar 3.5 Skema Turbin Angin Savonius	66
Gambar 3.6 Turbin Angin Savonius	67
Gambar 3.7 Silinder Pengganggu dan Dimensinya (dalam mm)	68
Gambar 3.8 Skema Penyangga Turbin Angin Savonius (dalam mm)	68
Gambar 3.9 Omega HHF141 <i>Digital Anemometer</i>	69
Gambar 3.10 <i>Tachometer</i> OMEGA seri HHT12	70
Gambar 3.11 <i>Torque Meter</i> LUTRON Model TQ-8800	71
Gambar 3.12 SANWA PC7000 <i>Digital Multimeter</i>	72
Gambar 3.13 <i>Voltage Regulator</i>	73
Gambar 3.14 Skema <i>Brake Dynamometer</i> (1) katrol, (2) benang, (3) beban pemberat, (4) pegas, (5) turbin angin Savonius, (6) poros, (7) penyangga	74
Gambar 3.15 Neraca Pegas NAGATA	75
Gambar 3.16 Massa Pemberat Anak Timbangan NHK tipe M-1	75
Gambar 3.17 Benang <i>Nylon Optimum</i> LAZER	76
Gambar 3.18 WD-40 <i>Multi-Use Product</i>	77
Gambar 3.19 <i>Flowchart</i> Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis	83
Gambar 3.20 <i>Flowchart</i> Menentukan Torsi Statis	85

Gambar 4.1 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi <i>Reynolds number</i>	94
Gambar 4.2 Grafik <i>Coefficient of power</i> Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i>	96
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i>	98
Gambar 4.4 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu (θ) pada $S/D = 1,4$	100
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Reynolds number</i> pada $y/D = 0,0$	103
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Reynolds number</i> pada $y/D = 0,25$	106
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Reynolds number</i> pada $y/D = 0,5$	109
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 9,7 \times 10^4$	112
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 14,5 \times 10^4$	115
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 17,8 \times 10^4$	118
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 9,7 \times 10^4$	121

Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 14,5 \times 10^4$ 124

Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 17,8 \times 10^4$ 127

Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ 130

Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu pada $Re = 14,5 \times 10^4$ 133

Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu pada $Re = 17,8 \times 10^4$ 136

Gambar A1. Grafik Keseragaman Aliran pada posisi Horizontal (X)163

Gambar A2. Grafik Keseragaman Aliran pada posisi Vertikal (Y)163

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai <i>Coefficient of Drag</i> pada Beberapa Bentuk Benda (Fox, et al., 2011)	23
Tabel 2.2 Variasi Panjang Plat Pengganggu (ℓ_1 dan ℓ_2) (Altan, et al., 2008).....	36
Tabel 3.1 Dimensi Primer Parameter.....	59
Tabel 3.2 Dimensi Primer Parameter.....	61
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>Axial Fan</i> CKE SPV-18	64
Tabel 3.4 Omega HHF141 <i>Digital Anemometer</i>	70
Tabel 3.5 Spesifikasi <i>Tachometer</i> OMEGA seri HHT12	71
Tabel 3.6 Spesifikasi <i>Torque Meter</i> LUTRON Model TQ-880072	73
Tabel 3.7 <i>Digital Multimeter</i> SANWA PC7000.....	73
Tabel 3.8 Spesifikasi <i>Voltage Regulator</i> Model TDGC 2J-3	74
Tabel 3.9 Spesifikasi pegas NAGATA.....	75
Tabel 3.10 Spesifikasi Anak Timbangan NHK tipe M-1	76
Tabel 3.11 Spesifikasi Pelumas WD-40 <i>Multi-Use Product</i>	77
Tabel 4.1 Kecepatan Aliran Udara pada Tiga Variasi <i>Reynolds number</i>	90
Tabel A1. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada <i>Reynolds Number</i> = $9,7 \times 10^4$	143
Tabel A2. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada <i>Reynolds Number</i> = $14,5 \times 10^4$	144
Tabel A3. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada <i>Reynolds Number</i> = $17,8 \times 10^4$	145

Tabel A4. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0$ pada <i>Reynolds Number</i> = $9,7 \times 10^4$	146
Tabel A5. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0$ pada <i>Reynolds Number</i> = $14,5 \times 10^4$	147
Tabel A6. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0$ pada <i>Reynolds Number</i> = $17,8 \times 10^4$	148
Tabel A7. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,25$ pada <i>Reynolds Number</i> = $9,7 \times 10^4$	149
Tabel A8. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,25$ pada <i>Reynolds Number</i> = $14,5 \times 10^4$	150
Tabel A9. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,25$ pada <i>Reynolds Number</i> = $17,8 \times 10^4$	151
Tabel A10. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,5$ pada <i>Reynolds Number</i> = $9,7 \times 10^4$	152
Tabel A11. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,5$ pada <i>Reynolds Number</i> = $14,5 \times 10^4$	153
Tabel A12. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,5$ pada <i>Reynolds Number</i> = $17,8 \times 10^4$	154
Tabel A13. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada <i>Reynolds number</i> = $9,7 \times 10^4$	155
Tabel A14. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada <i>Reynolds number</i> = $14,5 \times 10^4$	156

Tabel A15. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada <i>Reynolds number</i> = $17,8 \times 10^4$	157
Tabel A16. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$ pada $y/D = 0,5$ dan <i>Reynolds number</i> = $9,7 \times 10^4$	158
Tabel A17. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$ pada $y/D = 0,5$ dan <i>Reynolds number</i> = $14,5 \times 10^4$	159
Tabel A18. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$ pada $y/D = 0,5$ dan <i>Reynolds number</i> = $17,8 \times 10^4$	160
Tabel A19. Data Putaran Turbin Angin Savonius	161
Tabel A20. Data <i>Coefficient of Power</i> dan <i>Tip Speed Ratio</i> Turbin Angin Savonius	161
Tabel A21. Data <i>Coefficient of Moment</i> dan <i>Tip Speed Ratio</i> Turbin Angin Savonius	161
Tabel A22. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius	162
Tabel A23. Data <i>Uniformity</i>	162

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR SIMBOL

A	<i>cross sectional area</i> (m^2)
C _m	<i>coefficient of moment</i>
C _D	<i>coefficient of drag</i>
CoP	<i>coefficient of power</i>
D	diameter sudu turbin angin Savonius (mm)
D ₀	diameter <i>end plate</i> (mm)
d	diameter silinder pengganggu (mm)
E _k	energi kinetik (J)
e	diameter poros (mm)
F _D	<i>gaya drag</i>
g	gravitasi bumi (m/s^2)
H	tinggi turbin angin Savonius (mm)
L	diameter turbin angin Savonius (mm)
\dot{m}	laju alir massa angin (kg/s)
P _{in}	<i>power Input</i> (Watt)
P _{out}	<i>power Output</i> (Watt)
Pr	daya aktual turbin atau daya mekanik turbin (Watt)
P _w	daya kinetik angin (Watt)
Q	debit angin (m^3/s)
R	jari-jari sudu turbin angin Savonius (mm)
r	jari-jari poros turbin (mm)
Re	<i>Reynolds number</i>
S	jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (mm)
s	perpindahan pegas (mm)
T	torsi statis (Nm)
T _d	torsi dinamis turbin (Nm)
t	tinggi silinder pengganggu (mm)
U	kecepatan aliran fluida (m/s)
m	massa beban (kg)
x	tebal sudu turbin angin Savonius (mm)
y	jarak silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (mm)

ρ	massa jenis fluida (kg/m ³)
μ	viskositas dinamis fluida (N.s/m ²)
ω	kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
λ	<i>tip speed ratio</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan jumlah penduduk terbanyak keempat di dunia. Jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2017 telah mencapai angka 261 juta jiwa, dan diperkirakan akan meningkat menjadi 305 juta jiwa pada tahun 2035 mendatang (BPS, 2017). Dengan meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia, maka akan berdampak pada meningkatnya kebutuhan energi di Indonesia. Kebutuhan energi ini didapatkan dari sumber energi utama yaitu energi fosil. Energi fosil merupakan salah satu energi yang tidak dapat diperbaharui. Seiring dengan berjalannya waktu, ketersediaan energi fosil sangat terbatas dan terus mengalami penipisan. Hal ini dikarenakan alam memerlukan waktu yang lama untuk dapat kembali menyediakan energi fosil ini. Semakin menipisnya persediaan energi fosil menjadi kekhawatiran tersendiri bagi manusia yang mana saat ini manusia sangat bergantung pada energi fosil. Untuk mengatasi ketergantungan terhadap energi fosil, maka perlu adanya pengembangan untuk mendapatkan sumber energi terbarukan. Energi terbarukan dapat didefinisikan sebagai energi yang dapat secara cepat diproduksi kembali melalui proses alam. Salah satu energi energi terbarukan adalah energi angin.

Angin merupakan gerakan udara dari daerah yang mempunyai tekanan udara lebih tinggi ke daerah dengan tekanan udara yang lebih rendah, dan karena bergerak, angin memiliki energi kinetik. Angin juga merupakan sumber energi yang jumlahnya melimpah dan ramah lingkungan (tidak menimbulkan polusi udara), karena tidak menghasilkan gas buang yang dapat menyebabkan efek rumah kaca. Saat ini, energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang berkembang pesat di dunia. Hal ini dikarenakan energi angin dapat dikonversi atau ditransfer menjadi bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Berdasarkan hasil pemetaan

dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (**ESDM, 2014**), kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 3 – 6 m/s. Salah satu pemanfaatan energi angin adalah dengan turbin angin. Kini, turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin (**Daryanto, 2007**). Salah satu turbin angin yang cukup ideal untuk wilayah yang memiliki potensi angin seperti di Indonesia adalah turbin angin Savonius.

Turbin angin Savonius pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Finlandia **Sigurd J. Savonius** pada tahun 1922. Turbin angin Savonius merupakan salah satu turbin angin dengan poros sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*). Jika dilihat dari pandangan atas, turbin ini berbentuk seperti huruf S. Terdapat dua buah sudu pada turbin angin Savonius yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* adalah sudu cekung yang tegak lurus dengan arah datangnya aliran, sedangkan *returning blade* adalah sudu cembung yang tegak lurus terhadap arah datangnya aliran. Prinsip kerja dari turbin angin Savonius adalah dengan memanfaatkan aliran fluida yang bergerak dengan kecepatan tertentu, searah dengan sudu turbin sehingga menimbulkan gaya *drag* pada sudu-sudunya. Gaya *drag* total yang diakibatkan oleh aliran fluida tersebut adalah selisih dari gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Besar gaya *drag* tersebut dikonversi menjadi gaya putar sudu turbin sehingga didapatkan daya turbin. Untuk mendapatkan hasil daya yang maksimal maka selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* harus diperbesar. Untuk memperbesar perbedaan gaya *drag* tersebut dapat dilakukan dengan cara memberi pengganggu di depan *returning blade* sehingga dapat mengurangi gaya *drag* pada *blade* tersebut.

Turbin angin Savonius adalah turbin yang memiliki efisiensi paling rendah dibanding turbin lainnya. Oleh karena itu, banyak peneliti melakukan upaya untuk meningkatkan kinerja turbin Savonius. Penelitian yang dilakukan oleh **Altan et al (2008)**

pada turbin angin Savonius, dengan meletakkan dua buah plat pengganggu di depan turbin angin Savonius. Percobaan dilakukan dengan variasi panjang plat (l_1 dan l_2) dan besar sudut plat (α dan β). Kecepatan angin rata-rata yang digunakan adalah 7 m/s, dan dengan *Reynolds number* = $1,5 \times 10^4$. Hasil maksimal yang didapat adalah saat susunan sudut sudu pengganggu sebesar $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ dengan panjang plat pengganggu l_1 sebesar 45 cm dan l_2 sebesar 52 cm. Pada penyusunan dan variasi ini, didapatkan *power coefficient* (CoP) meningkat sebesar 38,5%. **Triyogi et al (2009)**, melakukan penelitian untuk mengurangi gaya *drag* pada silinder sirkular, menggunakan silinder pengganggu tipe I. Variasi sudut iris silinder pengganggu yang digunakan adalah $\theta_s = 0^\circ$ (*circular*), 10° , 20° , 30° , 45° , 53° dan 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular pada jarak $S/d = 1,375$. Penelitian ini dilakukan di dalam *subsonic wind tunnel* pada bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa silinder pengganggu sangat efektif untuk mengurangi gaya *drag* pada silinder sirkular, dimana silinder pengganggu tipe I ini memberikan *streamline* yang simetris di sekitar silinder sirkular dan menyebabkan hilangnya titik stagnasi pada silinder sirkular serta menunda terjadinya separasi pada silinder sirkular. Akibatnya, daerah *wake* di belakang silinder sirkular menjadi lebih sempit dan dapat mereduksi gaya *drag* yang terjadi pada silinder sirkular. Sudut iris 65° dengan sudut *stagger* 0° menghasilkan pengurangan lebih besar 52% dibandingkan dengan gaya drag pada silinder tunggal.

Penelitian lainnya yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**, yaitu untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan pengaruh jumlah *blade*, jumlah *stage* turbin, *overlap ratio*, *aspect ratio*, dan keberadaan *end plates* pada turbin angin Savonius. Pada penelitian ini terdapat beberapa parameter yang digunakan, seperti jumlah *blade* dengan 2 *blade* (2b), 3 *blade* (3b), dan 4 *blade* (4b); jumlah *stage* turbin dengan satu *stage* dan dua *stage*; *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3 dan 0,35, *aspect ratio* yang digunakan adalah sebesar 0,5; 1; 2; 4 dan 5 dengan ada

dan tidaknya *end plates* pada turbin angin Savonius. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih efisien daripada dengan tiga atau empat *blade*. Turbin dengan dua *stage* memiliki performa yang lebih optimum dibanding turbin dengan satu *stage*, karena specific power turbin dengan dua *stage* lebih besar daripada turbin dengan satu *stage*. Selain itu, pengoperasian turbin angin Savonius tanpa *overlap ratio* lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan *overlap ratio*. *Coefficient of power* dari turbin akan meningkat seiring dengan kenaikan *aspect ratio* (α). Penggunaan *end plates* pada turbin akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa menggunakan *end plates*.

Pada penelitian **M.H. Mohamed et al (2010)**, tentang peningkatan performa turbin angin Savonius menggunakan simulasi dengan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian ini dilakukan dengan memberikan pengganggu berupa plat datar di depan *returning blade*, dengan variasi besar sudut plat (β), *tip speed ratio* (λ), dan kecepatan angin (U) sebesar 10 m/s. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan antara turbin angin Savonius dua sudu dengan turbin angin Savonius tiga sudu, yang masing-masing diberi pengganggu berupa plat datar di depan *returning blade* pada masing-masing turbin. Didapatkan hasil simulasi bahwa *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan dua sudu dan dengan tiga sudu mempunyai peningkatan nilai CoP yang hampir sama. Pada turbin angin Savonius dua sudu yang diberi pengganggu, didapatkan nilai *coefficient of power* (CoP) yang dapat meningkat hingga 27,3% pada besar sudut plat (β) = $100,83^\circ$ serta speed ratio (λ) = 0,7. Sedangkan untuk turbin angin Savonius dengan tiga sudu yang diberi pengganggu, didapatkan nilai *coefficient of power* (CoP) yang dapat meningkat hingga 27,5% pada besar sudut plat (β) = $80,52^\circ$ serta speed ratio (λ) = 0,7.

Daniel Fernando (2017), melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini

dilakukan dengan memvariasikan rasio diameter silinder pengganggu (d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D), dan harga bilangan Reynolds. d/D yang digunakan adalah sebesar 0,75, variasi jarak silinder pengganggu terhadap sudu *returning blade* sebesar $1,5 \leq S/D \leq 2,4$, dan variasi Re sebesar $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$. Hasil dari penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Putaran turbin angin Savonius mengalami peningkatan sebesar 1,9 kali pada bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$ jika dibandingkan dengan turbin tanpa penghalang. Pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$, torsi statis mengalami peningkatan sebesar 1,74 kali dari turbin tanpa penghalang. Nilai *coefficient of power* memiliki kenaikan yang maksimal sampai 13,35 pada bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$. Selain itu, variasi jarak S/D yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius, dimana pada jarak $S/D = 1,6$ memiliki performa yang paling tinggi.

Dari beberapa penelitian yang ditunjukkan di atas, maka perlu dilakukan penelitian yang lebih mendalam untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius. Dalam penelitian yang akan dilakukan, memiliki fokus pada kenaikan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin. Penelitian dilakukan dengan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius (d/D) sebesar 0,5, rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) sebesar 1,4, variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0; 0,25; 0,5 dan dengan variasi Reynolds number = $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini akan menggunakan turbin angin Savonius dengan dua sudu turbin, yaitu *advancing blade* dan *returning*

blade. *Advancing blade* dan *returning blade* memiliki gaya *drag* yang timbul karena adanya aliran udara yang menabrak kedua sudu tersebut. Gaya *drag* yang diterima oleh *advancing blade* lebih besar daripada gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*, hal ini yang menyebabkan turbin angin Savonius berputar terhadap porosnya. Selisih gaya *drag* yang terjadi antara *advancing blade* dan *returning blade* tersebut jika dikalikan dengan panjang lengan pada turbin akan menghasilkan torsi, dan apabila nilai torsi tersebut dikalikan dengan kecepatan putaran turbin, maka akan menghasilkan daya *output* dari turbin. Jika selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* besar, maka daya *output* dari turbin yang dihasilkan akan semakin besar juga. Dengan kata lain, *coefficient of power* (CoP) juga akan semakin besar atau meningkat. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai CoP adalah dengan memberikan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius.

Pada penelitian kali ini, akan digunakan turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu dengan variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D). Pemasangan silinder pengganggu di depan sudu *returning* diharapkan dapat mengurangi *drag* dari sudu *returning* sehingga selisih torsi meningkat dan daya turbin meningkat. Hipotesa awal dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius, diduga dapat menyebabkan perbedaan tekanan total antara daerah di depan dan di belakang *returning blade*. Dimana, tekanan di depan *returning blade* turun, sedangkan tekanan di belakang *returning blade* diasumsikan sama seperti tekanan saat turbin tidak menggunakan silinder pengganggu. Sehingga *pressure drag* yang diakibatkan oleh selisih tekanan antara tekanan di depan dan di belakang *returning blade* menurun. Akibatnya, selisih

gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar. Hal ini akan menghasilkan torsi yang semakin besar dan *coefficient of power* juga akan meningkat.

2. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius, diduga dapat memberikan pengurangan gaya *drag* di sisi *returning blade*. Pemberian silinder pengganggu ini akan mengganggu boundary layer pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulenta. Akibatnya titik separasi pada *returning blade* mundur ke belakang dan daerah wake menyempit, sehingga menghasilkan gaya *drag* yang lebih kecil. Dengan berkurangnya gaya *drag* di sisi *returning blade* ini, maka akan memperbesar selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade*. Dengan semakin besarnya selisih gaya *drag*, maka selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat yang akan diikuti dengan meningkatnya daya dan *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius.
3. Pemberian variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0 ; 0,25 ; 0,5 memiliki pengaruh untuk mendapatkan posisi optimum dimana wake yang dihasilkan oleh silinder pengganggu dapat secara efektif menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin ketika turbin Savonius berputar, sehingga diduga dapat lebih banyak mengarahkan aliran udara menuju sisi *advancing blade*. Akibatnya gaya *drag* di sisi *advancing blade* akan meningkat seiring dengan pergeseran posisi y menuju *advancing blade* hingga mencapai posisi optimumnya. Setelah posisi y melewati jarak optimumnya, akan terjadi peningkatan gaya *drag* pada sisi *returning blade* dan selisih gaya *drag* kedua sudu akan menurun.

Sehingga nilai torsi, daya dan *coefficient of power* (CoP) yang dihasilkan turbin Savonius akan meningkat hingga jarak y optimum, kemudian turun seiring pertambahan jarak y melewati jarak y optimum.

Untuk membuktikan hipotesa diatas, maka akan dilakukan penelitian menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm serta silinder pengganggu dengan perbandingan $d/D = 0,5$ yang diletakkan di depan *returning blade*. Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) sebesar 1,4, variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0 ; 0,25 ; 0,5 dan dengan variasi Reynolds number = $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, digunakan beberapa batasan masalah agar bahasan yang dilakukan terarah dan tidak keluar dari tujuan yang ada. Batasan masalah yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa aliran adalah eksternal *flow*.
2. Aliran yang mengalir adalah *steady flow*, *incompressible flow*, dan *uniform* pada sisi *upstream*.
3. Penelitian dilakukan pada kondisi adiabatik dengan menggunakan aliran dua dimensi.
4. Analisa dilakukan pada turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm.
5. Analisa dilakukan dengan silinder pengganggu yang mempunyai diameter (d) = 88,8 mm.
6. Variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0 ; 0,25 ; 0,5.
7. Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) sebesar 1,4.

8. Penelitian dilakukan dengan variasi *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dan mengetahui pengaruh variasi y/D terhadap performa turbin angin Savonius. Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius (d/D) yang digunakan adalah sebesar 0,5 dan rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) adalah sebesar 0,0 ; 0,25 ; 0,5 dan variasi *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$ dengan cara:

1. Mengukur torsi statis turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
2. Mengukur torsi dinamis turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
3. Mengukur putaran turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
4. Menghitung *coefficient of power* turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
5. Menghitung *coefficient of moment* turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan saran atau masukan untuk pengembangan energi terbarukan, khususnya sumber energi angin.
2. Mampu menjelaskan pengaruh pemberian silinder pengganggu pada turbin angin Savonius terhadap nilai torsi, putaran, *coefficient of power* (CoP) dan *coefficient of moment* (Cm) turbin angin Savonius.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB II

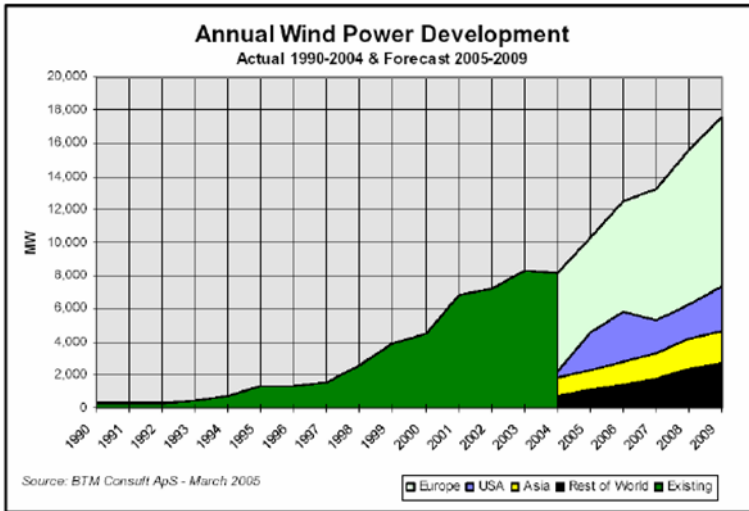
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Angin merupakan gerakan udara dari daerah yang mempunyai tekanan udara lebih tinggi ke daerah dengan tekanan udara yang lebih rendah, dan karena bergerak, angin memiliki energi kinetik. Angin terjadi karena adanya perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin yang menyebabkan terjadinya suatu perputaran udara berupa perpindahan udara. Angin juga merupakan sumber energi yang jumlahnya melimpah dan ramah lingkungan (tidak menimbulkan polusi udara), karena tidak menghasilkan gas buang yang dapat menyebabkan efek rumah kaca. Energi angin dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, karena energi angin merupakan energi terbarukan yang sangat fleksibel. Energi angin dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan misalnya pemompaan air untuk irigasi, pembangkit listrik, pengering atau pencacah hasil panen, aerasi tambak ikan/udang, pendingin ikan pada perahu-perahu nelayan, dan lain-lain.

Pemanfaatan energi angin dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, yang seiring berjalannya waktu, ketersediaan energi fosil sangat terbatas dan terus mengalami penipisan. Energi angin merupakan salah satu energi terbarukan. Energi terbarukan adalah energi yang dapat diperbaharui dan apabila dikelola dengan baik, sumber daya itu tidak akan habis (**Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM)**). Saat ini, energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang berkembang pesat di dunia. Hal ini dikarenakan energi angin dapat dikonversi atau ditransfer menjadi bentuk energi lain, seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Walaupun pemanfaatan energi angin dapat dilakukan dimana saja, daerah-daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi tetap perlu diidentifikasi

agar pemanfaatan energi angin ini lebih kompetitif dibandingkan dengan energi alternatif lainnya.



Gambar 2.1 Laju Pertumbuhan Energi Angin Tahunan di Dunia (Daryanto, 2007)

Gambar 2.1 diatas menunjukkan laju pertumbuhan energi angin tahunan di dunia. Berdasarkan hasil pemetaan dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (**KESDM, 2014**), kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 3 – 6 m/s. Secara umum, pemanfaatan tenaga angin di Indonesia memang kurang mendapat perhatian. Sampai tahun 2004, kapasitas terpasang dari pemanfaatan tenaga angin hanya mencapai 0,5 MW dari 9,29 GW potensi yang ada (**DESDM, 2005**). Padahal kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia telah berkembang pesat dengan laju pertumbuhan kumulatif sampai dengan tahun 2004 melebihi 20% per tahun. Dari kapasitas terpasang 5 GW pada tahun 1995 menjadi hampir 48 GW pada akhir tahun 2004 tersebar dalam 74.400 turbin angin di sekitar 60 negara (**BTM Consults ApS, 2005**).

2.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain-lain. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *Windmill*. Turbin angin merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang banyak dikembangkan karena hanya membutuhkan energi angin sebagai penggerakannya. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin (**Daryanto, 2007**). Meskipun daya yang dihasilkan tidak sebesar pembangkit lainnya, akan tetapi turbin angin merupakan solusi yang paling mudah untuk memenuhi kebutuhan listrik penduduk dengan cakupan yang kecil.

Setiap jenis turbin angin mempunyai ukuran dan efisiensi yang berbeda. Pada umumnya turbin angin yang mempunyai jumlah sudu banyak akan mempunyai torsi yang besar. Turbin angin jenis ini banyak digunakan untuk keperluan mechanical seperti pemompaan air, pengolahan hasil pertanian dan aerasi tambak. Sedangkan, turbin angin dengan jumlah sudu sedikit, misalnya dua atau tiga, digunakan untuk keperluan pembangkitan listrik. Turbin angin jenis ini mempunyai torsi rendah, tetapi putaran rotor tinggi. Daya yang dihasilkan oleh turbin angin yang berada di Indonesia pada suatu pesisir pantai kurang lebih 800 KW. Sehingga hanya cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat sekitar saja. Saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional, misalnya PLTD, PLTU, dan lain-lain. Namun, turbin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, contohnya batubara dan minyak bumi sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik.

Adapun gambar dari turbin angin dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal (www.google.com)

Turbin angin terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu rotor, baling-baling yang melekat pada rotor, generator dan struktur menara. Rotor merupakan elemen dari turbin angin, berfungsi untuk mengumpulkan energi yang berasal dari angin. Baling-baling turbin angin melekat pada pusat rotor. Baling-baling ini diputar oleh aliran angin dengan menggunakan desain aerodinamis. Adapun tingkat putaran dari baling-baling ini tergantung pada kecepatan angin dan bentuk baling-balingnya. Komponen yang lain adalah generator, generator merupakan komponen terpenting dalam sistem turbin angin. Fungsi dari generator adalah merubah energi gerak (mekanik) putar pada poros penggerak menjadi energi listrik. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berupa *Alternating Current* (AC) maupun *Direct Current* (DC), dan tegangan *output* nya bisa dari tegangan rendah (12 volt) sampai tegangan 680 volt atau lebih. Menara merupakan tiang penyangga yang fungsi utamanya adalah untuk menopang rotor dan semua komponen turbin angin yang

berada diatasnya. Menara dapat berupa tipe *latice* atau pipa (turbular), baik yang dibantu dengan penopang tali pancang maupun yang *self supporting*.

Prinsip kerja dari turbin angin adalah mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut kemudian digunakan untuk memutar generator agar menghasilkan menghasilkan listrik. Dalam turbin angin komersial terdapat *gearbox* yang ditempatkan di antara rotor dan generator. *Gearbox* ini berfungsi ntuk mengubah kecepatan putaran rendah baling-baling ke rotasi kecepatan tinggi yang diperlukan untuk memproduksi listrik. Kecepatan rotasi turbin angin biasanya antara 40-400 rpm (rotasi per menit), sedangkan untuk menghasilkan listrik kita membutuhkan 1200-1800 rpm. Untuk pemasangannya, turbin angin ini terpasang pada bagian atas struktur menara tinggi (biasanya di atas 80 meter) untuk dapat beroperasi pada ketinggian yang diperlukan. Turbin angin memanfaatkan aliran angin pada ketinggian yang lebih tinggi karena kecepatannya yang lebih tinggi dan lebih konstan (karena pengaruh penurunan *drag*). Turbin angin dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*) (**Daryanto, 2007**). Berikut merupakan penjelasannya:

2.2.1 *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) atau turbin angin sumbu horizontal, merupakan turbin angin komersial dengan tipe lama yang biasanya banyak digunakan. Turbin ini memiliki ciri khas, yaitu berputar dengan mengikuti sumbu horizontal turbin angin, dimana poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Biasanya sudu turbin ini berbentuk seperti sayap pada pesawat. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) memiliki *shaft* rotor dan generator pada puncak tower dan harus diarahkan ke arah angin bertiup. Gambar 2.3 berikut ini merupakan gambar salah satu contoh turbin angin sumbu horizontal, turbin angin sumbu *horizontal triple blades*.



Gambar 2.3 Salah Satu Contoh Turbin Angin Sumbu Horizontal
(*Triple Blades*) (www.google.com)

Untuk turbin kecil mengarah ke angin dengan menggunakan *wind plane* yang diletakkan di rotor, sementara untuk turbin yang lebih besar dilengkapi dengan sensor yang terhubung dengan motor servo yang mengarahkan *blade* sesuai dengan arah angin. Umumnya, turbin besar memiliki *gearbox* yang dapat mempercepat kecepatan putar rotor yang ditransfer ke generator. Turbin ini cocok digunakan pada tipe angin dengan kecepatan sedang dan tinggi, serta banyak digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar.

Pada turbin angin sumbu horizontal, putaran dapat terjadi karena adanya gaya angkat pada *blade* yang ditimbulkan oleh aliran angin. Secara umum, semakin banyak jumlah *blade* maka akan semakin tinggi putaran turbin. Kelebihan dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah mempunyai efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal, karena *blades* selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin sehingga jika semakin tinggi menara turbin, maka daya yang dihasilkan akan

semakin besar karena kecepatan angin juga semakin besar. Pada beberapa area, setiap 10 meter ada kenaikan tambahan kekuatan angin sebesar 20% dan peningkatan daya 34%. Sedangkan kekurangan dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah membutuhkan sistem pengereman untuk mencegah putaran *blades* yang terlalu kencang akibat kecepatan angin yang terlalu tinggi. Kekurangan lainnya adalah, karena turbin ini tinggi, maka akan membutuhkan biaya instalasi yang besar.

2.2.2 *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) atau turbin angin sumbu vertikal, merupakan turbin yang mempunyai shaft rotor vertikal yang menyebabkan turbin akan berputar pada sumbu vertikal juga. Kegunaan utama dari *shaft rotor* vertikal ini adalah turbin angin tidak perlu diarahkan ke arah angin bertiup. Tentunya, hal ini akan sangat berguna pada daerah yang memiliki arah angin sangat variatif atau memiliki turbulensi. Dengan sumbu vertikal, generator dan komponen primer lainnya dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, sehingga tidak perlu *support* dari *tower*, hal ini menyebabkan *maintenance* lebih mudah. Turbin angin sumbu vertikal tidak memerlukan kecepatan angin yang tinggi dan teratur seperti pada turbin angin sumbu horizontal. Hal ini menyebabkan turbin angin jenis ini dapat diletakkan pada ketinggian yang lebih rendah. Gambar 2.4 berikut ini merupakan gambar salah satu contoh turbin angin sumbu vertikal yaitu turbin Darrieus.



Gambar 2.4 Salah Satu Contoh Turbin Angin Sumbu Vertikal (Darrieus Turbine) (www.google.com)

Kelebihan dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah memiliki torsi tinggi, sehingga bisa berputar pada kecepatan angin yang rendah, sistem *maintenance* lebih mudah dibandingkan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) karena generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin, sehingga mempermudah proses perbaikan dan penggantian part. Kelebihan lainnya adalah *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) memiliki kecepatan *startup* angin yang rendah dibandingkan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Sedangkan kekurangan dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah efisiensi lebih rendah jika dibandingkan dengan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), karena rotor terletak dekat dengan tanah dimana kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah. Selain itu, turbin angin jenis ini kurang familiar di kalangan masyarakat dikarenakan memiliki kerugian serius seperti yang disebutkan diatas, sehingga pengembangannya termasuk dalam golongan lambat. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dibagi menjadi dua jenis, yaitu Savonius dan Darrieus. Turbin Savonius diciptakan pertama kali di negara Finlandia dan berbentuk seperti

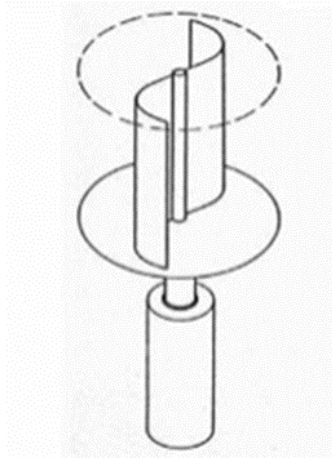
huruf S jika dilihat dari pandangan atas. Turbin Savonius secara umum bergerak lebih pelan dibandingkan jenis turbin angin sumbu horizontal, tetapi menghasilkan torsi yang besar. Sedangkan turbin Darrieus mula-mula diperkenalkan di Perancis pada sekitar tahun 1920-an. Turbin Darrieus ini mempunyai bilah-bilah tegak yang berputar ke dalam dan ke luar dari arah angin (**Daryanto, 2007**).

2.3 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis dari turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*). Turbin angin Savonius pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin angin Savonius merupakan salah satu turbin angin dengan poros sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)). Jika dilihat dari pandangan atas, turbin ini berbentuk seperti huruf S. Turbin ini juga disebut sebagai turbin *drag* karena cara menggerakkannya memanfaatkan gaya *drag* pada sudu-sudunya. Terdapat dua buah sudu pada turbin angin Savonius yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* adalah sudu cekung yang tegak lurus dengan arah datangnya aliran, sedangkan *returning blade* adalah sudu cembung yang tegak lurus terhadap arah datangnya aliran.

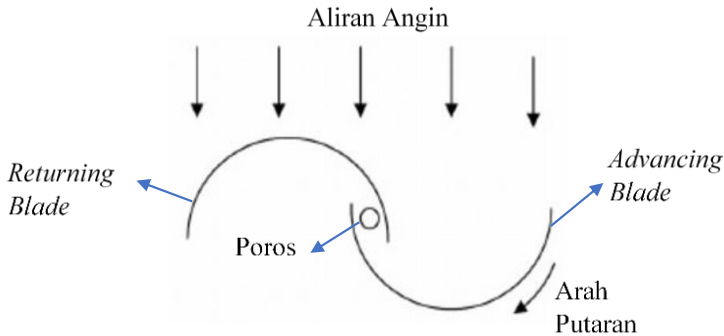
Prinsip kerja dari turbin angin Savonius adalah dengan memanfaatkan aliran fluida yang bergerak dengan kecepatan tertentu, searah dengan sudu turbin sehingga menimbulkan gaya *drag* pada sudu-sudunya. Gaya *drag* total yang diakibatkan oleh aliran fluida tersebut adalah selisih dari gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Besar gaya *drag* tersebut dikonversi menjadi gaya putar sudu turbin sehingga didapatkan daya turbin. *Advancing blade* dan *returning blade* memiliki gaya *drag* yang timbul karena adanya aliran udara yang menabrak kedua sudu tersebut. Gaya *drag* yang diterima oleh *advancing blade* berbeda dengan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Gaya *drag* yang diterima oleh *advancing blade* lebih besar daripada gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*, hal ini yang menyebabkan turbin angin tipe Savonius berputar terhadap porosnya.

Selisih gaya *drag* yang terjadi antara *advancing blade* dan *returning blade* jika dikalikan dengan panjang lengan pada turbin akan menghasilkan torsi, dan apabila nilai torsi tersebut dikalikan dengan kecepatan putaran turbin, maka akan menghasilkan daya *output* dari turbin. Jika selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* besar, maka daya *output* dari turbin yang dihasilkan akan semakin besar juga. Dengan kata lain, *coefficient of power* (CoP) juga akan semakin besar atau meningkat. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai CoP adalah dengan memberikan sebuah silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius. Kelebihan dari turbin angin Savonius adalah tidak memerlukan torsi awal untuk memutarinya dan sebagai sumber listrik untuk keperluan yang kecil seperti pompa air. Gambar turbin Savonius dan arah aliran angin turbin Savonius ditunjukkan pada gambar 2.5 dan 2.6 berikut ini.



Gambar 2.5 Turbin Angin Savonius

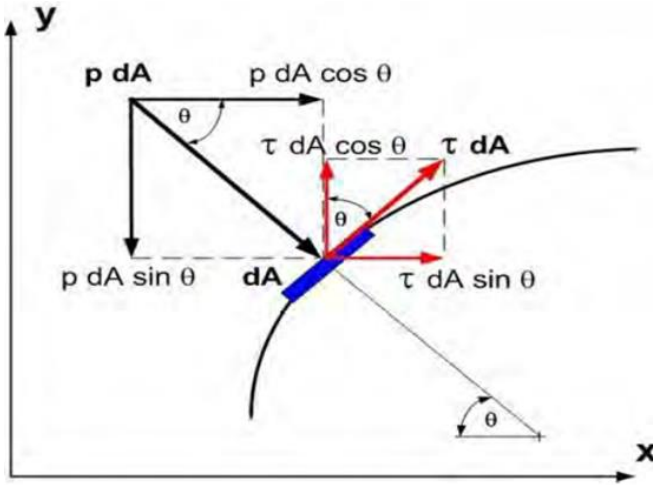
(<http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm>.)



Gambar 2.6 Arah Aliran Angin Turbin Savonius

2.4 Gaya Drag

Sebuah body jika ditempatkan dalam aliran fluida, maka body tersebut akan mendapatkan gaya dari aliran yang mengelilinginya. Secara umum, gaya tersebut ada dua, yaitu gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*). Gaya-gaya tersebut dihasilkan karena adanya tekanan (p) dan *skin friction* (τ). Gaya hambat terjadi karena adanya pergesekan dengan fluida sekitar dimana terjadi pada kondisi aliran *viscous* dan *incompressible*. Sedangkan gaya *lift* (gaya angkat) adalah gaya yang mempunyai arah vertikal atau tegak lurus dengan arah aliran. *Drag* merupakan komponen dari gaya pada suatu benda yang bekerja secara paralel atau sejajar terhadap arah aliran atau angin. Gaya *drag* memiliki arah sejajar (horizontal) dengan arah alirannya. Gaya hambat yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}), yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda) ataupun terjadi berupa *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *skin friction drag* dan *pressure drag* disebut sebagai total *drag* seperti pada gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Skema Sederhana Penguraian Gaya *Drag*

Berdasarkan gambar 2.7 diatas, dA merupakan elemen luasan pada body yang dikenai gaya *drag*. *Skin friction drag* (F_{Df}) merupakan integrasi dari seluruh permukaan body terhadap gaya τdA , sedangkan *pressure drag* (F_{Dp}) merupakan integrasi dari seluruh permukaan *body* terhadap gaya $p dA$, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_{Df} = \int_A \tau dA \sin \theta \quad (2.1)$$

$$F_{Dp} = \int_A p dA \cos \theta \quad (2.2)$$

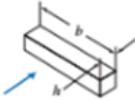






Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.2, gaya *drag* total (*total drag*) yang terbentuk dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_D = F_{Df} + F_{Dp} \quad (2.3)$$

$$F_D = \int_A \tau dA \sin \theta + \int_A p dA \cos \theta \quad (2.4)$$

Coefficient of drag (C_D) merupakan bilangan tidak berdimensi yang besarnya berbeda, tergantung pada bentuk dari *body*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Nilai *Coefficient of Drag* pada Beberapa Bentuk Benda (Fox, et al., 2011)

Object	Diagram	$C_D(Re \geq 10^3)$	
Square prism		$b/h = \infty$	2.05
		$b/h = 1$	1.05
Disk			1.17
Ring			1.20^b
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing flow)			2.30
C-section (open side facing downstream)			1.20

^aData from Hoerner [16].
^bBased on ring area.

Coefficient of drag (C_D) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \tag{2.5}$$

- dimana :
- C_D = *Coefficient of drag*
 - F_D = *Gaya drag* (Newton)
 - A = *Luas permukaan benda* (m^2)

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 &= \text{Tekanan dinamis aliran bebas} \\ \rho &= \text{Massa jenis fluida (kg/m}^3\text{)} \\ U &= \text{Kecepatan aliran fluida (m/s)}\end{aligned}$$

2.5 Perhitungan Torsi Statis

Torsi adalah nilai kuantitatif dari sebuah gaya yang menyebabkan terjadinya gerak rotasi suatu benda, yang besarnya bergantung pada gaya *drag* dan jari-jari dari turbin. Torsi statis adalah torsi yang digunakan untuk menahan turbin agar turbin tetap pada posisinya.

Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = F_D \cdot R \quad (2.6)$$

atau,

$$T = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \cdot R \quad (2.7)$$

dimana : T = Torsi statis (Nm)
 C_D = *Coefficient of drag*
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)
 U = Kecepatan aliran fluida (m/s)
 A = Luas permukaan benda (m²)
 R = Jari-jari turbin (m)

2.6 Bilangan Reynolds (*Reynolds Number*)

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasi apakah suatu aliran fluida merupakan aliran laminar, transisi atau turbulen. Kata Reynolds diambil dari nama **Osborne Reynolds (1842-1912)** yang merupakan seorang inovator terkemuka asal Belfast, Irlandia. Pada tahun 1883, **Osborne Reynolds** mempublikasikan hasil penelitiannya tentang

pengidentifikasian tipe aliran berdasarkan suatu bilangan tak berdimensi yang selanjutnya disebut dengan bilangan Reynolds.

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{gaya viscous}} \quad (2.8)$$

dimana,

$$\text{Gaya inersia} = p \cdot A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.9)$$

$$\text{Gaya viscous} = \tau \cdot A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) L^2 \quad (2.10)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) L^2} = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (2.11)$$

dimana : Re = Reynolds number
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
 U = Kecepatan aliran fluida (m/s)
 L = Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)
 μ = Viskositas dinamis fluida (Ns/m^2)

Dalam studi eksperimen ini, panjang karakteristik (L) yang dimaksud adalah diameter turbin (L), yaitu dua kali diameter sudu turbin (D) dikurangi diameter poros antara kedua sudu turbin (e) dan tebal sudu turbin angin (x), atau dapat dituliskan sebagai berikut:

$$L = 2D - e - 2x \quad (2.12)$$

Sehingga, dapat dituliskan persamaan bilangan *Reynolds* sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{\rho \cdot U \cdot (2D - e)}{\mu} \quad (2.13)$$

2.7 Perhitungan Daya

Prinsip utama dari turbin angin adalah laju energi angin yang dapat dikonversikan oleh turbin menjadi energi mekanik, sedangkan prinsip kerja dari turbin angin Savonius adalah dengan memanfaatkan aliran fluida yang bergerak dengan kecepatan tertentu, searah dengan sudu turbin sehingga menimbulkan gaya *drag* pada sudu-sudunya. Gaya *drag* total yang diakibatkan oleh aliran fluida tersebut adalah selisih dari gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Besar gaya *drag* tersebut dikonversi menjadi gaya putar sudu turbin sehingga didapatkan daya turbin. Berikut merupakan teori perhitungan daya yang menjadi indikator performa dari turbin angin Savonius.

2.7.1 Perhitungan Daya Turbin Secara Teoritis

Besarnya laju energi angin yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin angin secara teoritis dipengaruhi oleh besarnya energi kinetik yang dihasilkan udara dan laju aliran massa dari udara. Besarnya energi kinetik dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (2.14)$$

Dimana, m merupakan massa udara dan U merupakan kecepatan udara. Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu (m) adalah:

$$\dot{m} = \rho \cdot U \cdot A \quad (2.15)$$

Sehingga, daya kinetik dari angin (P_w) adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U \cdot A \cdot U^2 \quad (2.16)$$

atau,

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2.17)$$

dimana : Ek = Energi kinetik (Joule)
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
 U = Kecepatan aliran fluida (m/s)
 A = Luas penampang turbin angin Savonius (m^2)
 P_w = Daya kinetik angin (Watt)

2.7.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin

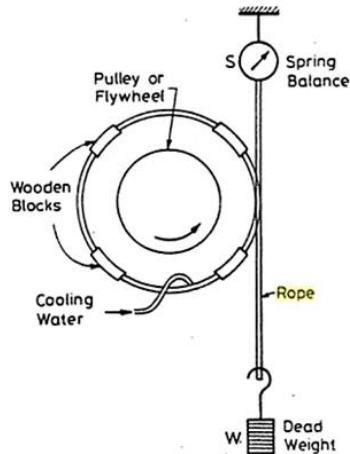
Sebelum menentukan nilai dari daya aktual turbin, dibutuhkan data besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh aliran fluida pada turbin angin Savonius. Alat yang akan digunakan untuk menghitung besarnya torsi dinamis tersebut adalah *brake dynamometer*. Torsi dinamis merupakan besar torsi minimal yang diperlukan ketika poros sudah berputar dan merupakan besar torsi yang dibutuhkan untuk menghentikan putaran poros turbin. Perhitungan daya aktual atau daya mekanik turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Pr = T_d \cdot \omega \quad (2.18)$$

dimana: Pr = Daya aktual turbin atau daya mekanik turbin angin Savonius (Watt)
 T_d = Torsi dinamis turbin angin Savonius (Nm)
 ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
 $= \frac{2\pi \cdot n}{60}$

2.8 Rope Brake Dynamometer

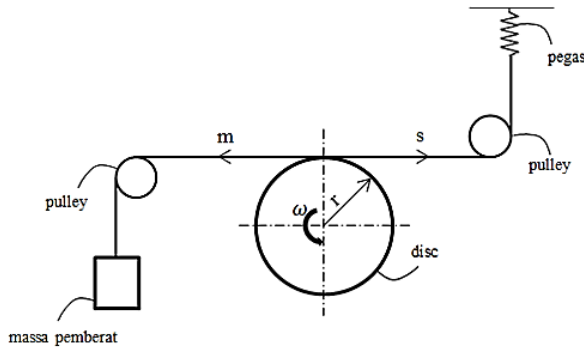
Pada penelitian ini, pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer*, dimana mekanisme dari *brake dynamometer* ini dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8 Mekanisme *Rope Brake Dynamometer*
(Brar & Bansal, 2004)

Gambar 2.8 menunjukkan bahwa *rope brake dynamometer* terdiri tali yang diikat melingkari tepi katrol yang terpasang pada poros yang dayanya akan diukur. Bagian ujung atas tali dipasang *spring balance* (s) sedangkan pada bagian ujung bawah tali dihubungkan dengan pemberat (m). Untuk pengukuran daya dilakukan pada kecepatan konstan dimana pada kondisi tersebut, torsi yang ditransmisikan oleh poros harus sama dengan torsi akibat gaya gesek tali.

Adapun *brake dynamometer* tidak dapat menyajikan nilai torsi dinamis secara langsung. Namun pengukuran yang dilakukan pada *brake dynamometer* dapat diukur melalui pengukuran massa pemberat dan massa yang terbaca pada pegas. Kemudian nilai torsi dinamis harus dihitung berdasarkan *Free Body Diagram* pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 FBD *Brake Dynamometer*

Melalui Gambar 2.9, nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$Td = (m - s) \times g \times r \quad (2.19)$$

Sehingga, dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Pr = (m - s) \times g \times r \times \omega \quad (2.20)$$

dimana: Pr = Daya aktual turbin atau daya mekanik turbin angin Savonius (Watt)
 m = Massa beban (kg)
 s = Perpindahan pegas (m)
 g = Gravitasi bumi (m/s^2)
 r = Jari-jari poros turbin (m)
 ω = Putaran poros (rad/s)

2.9 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. *Tip speed ratio* (TSR) dilambangkan dengan λ . TSR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2.21)$$

dimana : λ = *Tip Speed Ratio* (TSR)
 ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s) = $\frac{2\pi n}{60}$
 R = Jari-jari turbin angin Savonius (m) = $\frac{2D-e}{2}$
 U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

2.10 *Coefficient of Power (CoP) dan Coefficient of moment*

Coefficient of power (CoP) adalah perbandingan antara daya mekanik turbin ketika mendapat aliran fluida (Pr) dengan daya kinetik dari angin itu sendiri (Pw). Jadi, ada dua faktor utama yang mempengaruhi nilai dari CoP, yaitu daya mekanik dari turbin karena terkena angin, dan daya kinetik dari angin itu sendiri. *Coefficient of power* (CoP) ini digunakan untuk menentukan besarnya performa turbin angin. *Besarnya coefficient of power* (CoP) ditunjukkan sebagai berikut:

$$CoP = \frac{Pr}{Pw} \quad (2.22)$$

Besarnya nilai daya kinetik dari angin (Pw) dan daya mekanik turbin (Pr) dapat diketahui dari persamaan yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, yaitu pada persamaan 2.17 dan 2.20. Sehingga besarnya *coefficient of power* (CoP) dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$CoP = \frac{(m-s) \times g \times r \times \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (2.23)$$

dimana : CoP = *Coefficient of Power*
 m = Massa beban (kg)
 s = Perpindahan pegas (m)
 g = Gravitasi bumi (m/s²)

- r = Jari-jari poros turbin (m)
 ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
 U = Kecepatan aliran fluida (m/s)
 A = Luas penampang turbin angin Savonius (m^2)

Coefficient of moment (C_m) merupakan perbandingan antara torsi real yang dimiliki oleh rotor dengan torsi teoritis yang besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut:

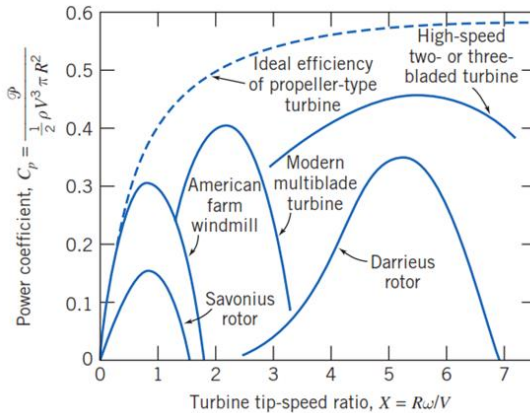
$$C_m = \frac{2.T_d}{\rho.A.U^2.R} \quad (2.24)$$

- dimana: T_d = Torsi dinamis turbin angin Savonius (Nm)
 R = Jari-jari turbin angin Savonius (m) = $\frac{L}{2}$
 L = Diameter turbin angin Savonius (m)

Dari persamaan 2.22 dan 2.23 maka didapatkan hubungan antara *coefficient of power* (CoP) dan *coefficient of moment* (C_m) dengan *tip speed ratio* sebagai berikut :

$$\frac{C_{op}}{C_m} = \frac{\omega.R}{U} = \lambda \quad (2.25)$$

Hubungan antara *coefficient of power* (CoP) dengan *tip speed ratio* (TSR) dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut ini.



Gambar 2.10 Grafik Nilai *Coefficient of Power* sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* untuk Berbagai Turbin Angin (Fox, et al., 2011)

Setiap tipe turbin angin memiliki karakter yang berbeda mengenai hubungan antara *coefficient of power* (CoP) dengan *tip speed ratio* (λ). Titik mulai grafik menunjukkan bahwa turbin angin akan mulai bekerja pada nilai TSR tertentu. Jika titik mulai berada pada TSR rendah, maka turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin rendah. Selain itu, berdasarkan gambar 2.9 diatas secara umum pada grafik tiap turbin juga ditunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya TSR, tidak serta merta akan meningkatkan nilai *coefficient of power* (CoP). Pada saat tertentu saja nilai *coefficient of power* (CoP) akan berada pada posisi maksimum. Batas Betz (*Betz Limit*) merupakan batas *coefficient of power* terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin dibanding energi mekanik yang dihasilkan aliran udara yang mengenainya. Seorang ahli aerodinamika Jerman, **Albert Betz**, menemukan bahwa nilai *coefficient of power* maksimum untuk turbin angin adalah 0,593 (59,3%).

2.11 Penelitian Terdahulu

Untuk memudahkan pelaksanaan penelitian ini, maka diperlukan beberapa referensi dari penelitian-penelitian terdahulu

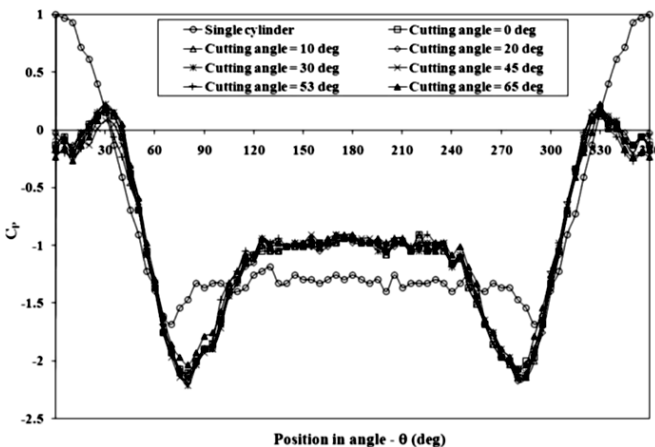
yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian yang akan dijabarkan adalah penelitian yang dilakukan oleh **Altan et al (2008)** tentang studi eksperimen peningkatan performa turbin angin Savonius dengan plat penghalang dan plat pengarah, penelitian yang dilakukan oleh **Triyogi et al (2009)** tentang pengurangan gaya *drag* pada silinder sirkular dengan menggunakan silinder pengganggu tipe I, penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)** tentang studi eksperimen peningkatan performa turbin angin Savonius dengan menggunakan pengaruh variasi parameter geometri dari turbin angin Savonius, penelitian yang dilakukan oleh **Mohamed et al (2010)** tentang peningkatan performa turbin angin tipe Savonius berpengganggu plat datar dengan menggunakan simulasi software *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dan penelitian yang dilakukan oleh **Daniel Fernando (2017)** tentang pengaruh silinder sirkular sebagai pengganggu aliran di depan sisi *returning blade* terhadap performa turbin angin tipe Savonius. Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan sebagai berikut.

2.11.1 Pengurangan Gaya *Drag* pada Silinder Sirkular dengan Menggunakan Silinder Pengganggu Tipe I

Penelitian yang dilakukan oleh **Triyogi et al (2009)**, yaitu penelitian untuk mengurangi gaya *drag* pada silinder sirkular dengan menggunakan pengganggu berupa silinder pengganggu tipe I. Silinder pengganggu ini mempengaruhi distribusi tekanan pada silinder utama dengan *shear layer* serta dapat memperbesar daerah *wake* sehingga mampu mengubah titik separasi dan mengurangi gaya hambat pada silinder utama. Diameter silinder (d) yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 60 mm dengan tujuh buah potongan *bluff body* dari diameter silinder pengganggu (d_s) sebesar 7,5 mm. Variasi sudut iris silinder pengganggu yang digunakan adalah $\theta_s = 0^\circ$ (*circular*), 10° , 20° , 30° , 45° , 53° dan 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular pada jarak $S/d = 1,375$. Penelitian ini dilakukan di dalam *wind*

tunnel dengan kecepatan angin konstan sebesar 14 m/s dan bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$.

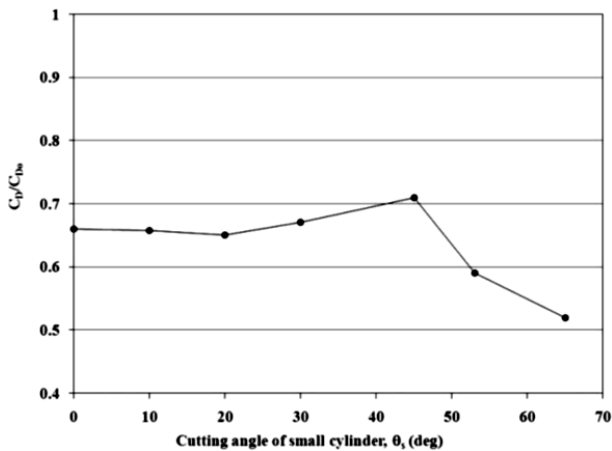
Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi *pressure coefficient* (C_p) adalah simetris untuk semua silinder penghalang. Distribusi *pressure coefficient* (C_p) di sekitar silinder sirkular pada $Re = 5,3 \times 10^4$ untuk variasi sudut iris $\theta_s = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ$ dan 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular pada jarak $S/d = 1,375$ dapat dilihat pada gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Distribusi *Pressure Coefficient* (C_p) pada Silinder Sirkular dengan Variasi Sudut Iris pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi, et al., 2009)

Berdasarkan gambar 2.11 diatas, nilai C_p untuk bagian depan mendekati 0 atau bernilai negatif sedangkan nilai maksimum C_p sebesar 0,1 - 0,2 pada *reattachment region*, dimana *shear layer* terseparasi dari silinder penghalang. Posisi *reattachment region* terletak pada $\theta = 30^\circ$ (bagian atas) dan $\theta = 330^\circ$ (bagian bawah). Untuk sudut iris $\theta_s = 53^\circ$, dihasilkan nilai C_p terendah yaitu sebesar -2,14 pada posisi $\theta = 80^\circ$ (bagian atas) dan $\theta = 280^\circ$ (bagian bawah). Selain itu, didapatkan hasil bahwa pemberian silinder

penghalang mampu menunda terjadinya separasi pada bagian atas dan bagian bawah silinder utama. Gambar 2.11 menunjukkan pengaruh variasi sudut iris terhadap ratio koefisien *drag* dengan dan tanpa silinder penghalang (C_D/C_{D0}), dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa silinder sirkular dengan silinder penghalang memiliki koefisien *drag* yang lebih kecil dibanding dengan silinder sirkular tanpa silinder penghalang atau $(C_D/C_{D0}) < 1$.



Gambar 2.12 Variasi Sudut Potong Silinder Penghalang terhadap Perbandingan C_D/C_{D0} pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi, et al., 2009)

Berdasarkan gambar 2.12 diatas, dapat dilihat bahwa pada sudut iris $\theta_s = 65^\circ$ menunjukkan pengurangan gaya *drag* paling tinggi dengan perbedaan maksimum sebesar 14% terhadap $\theta_s = 0^\circ$, sedangkan sudut iris $\theta_s = 45^\circ$ menunjukkan pengurangan gaya *drag* paling rendah. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa silinder pengganggu tipe I pada sudut iris $\theta_s = 65^\circ$ mampu mengurangi gaya *drag* secara efektif, dimana besar gaya *drag* pada sudut iris tersebut adalah sebesar 0,52 kali dari silinder sirkular tanpa penghalang.

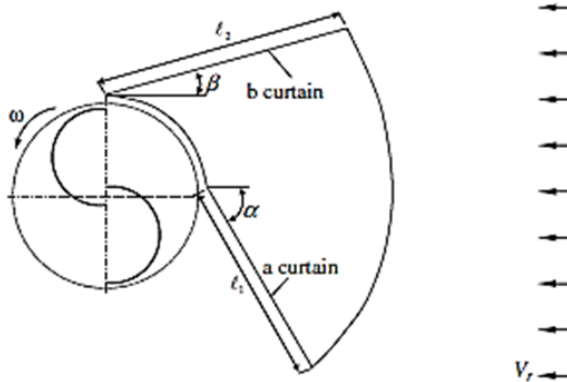
2.11.2 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Plat Penghalang dan Plat Pengarah

Penelitian ini dilakukan oleh Altan et al (2008) dengan meletakkan dua buah plat pengganggu di depan turbin angin Savonius, dengan kecepatan angin sebesar 7 m/s dan *Reynolds number* = $1,5 \times 10^4$. Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius dengan dua buah sudu, dengan diameter turbin (D) dan tinggi turbin (H) sebesar 32 cm. Eksperimen dilakukan dengan variasi panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) dan variasi besar sudut plat (α dan β). Plat pengganggu diletakkan di depan *returning blade* sebagai plat penghalang dan plat pengganggu lainnya diletakkan di depan *advancing blade* sebagai pengarah aliran angin, kedua plat diletakkan di depan turbin dengan sudut α dan β terhadap arah datangnya aliran angin. Besar variasi panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Variasi Panjang Plat Pengganggu (ℓ_1 dan ℓ_2)
(Altan, et al., 2008)

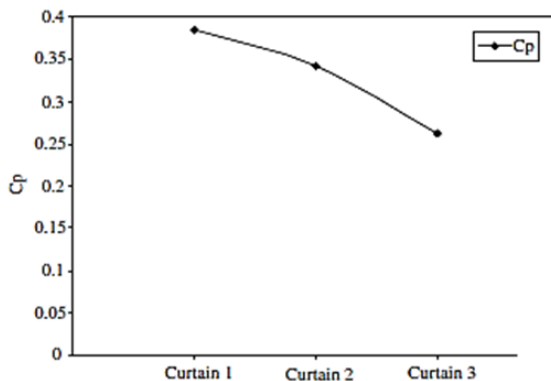
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Sedangkan, besar sudut plat (α dan β) yang digunakan dalam penelitian adalah $\alpha = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ dan dengan $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$. Skema susunan pengganggu turbin angin Savonius dapat dilihat pada gambar 2.13 berikut ini.



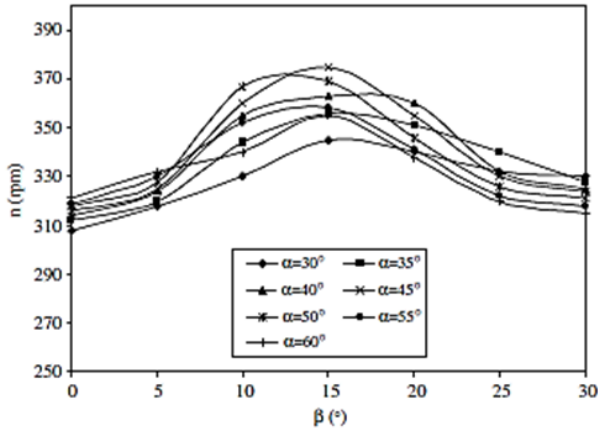
Gambar 2.13 Skema Susunan Pengganggu Turbin Angin Savonius (Altan, et al., 2008)

Dari penelitian tersebut didapatkan hasil maksimum nilai *power coefficient* (CoP) sebesar 0,38533 (*curtain 1*), 0,34154 (*curtain 2*), dan 0,26273 (*curtain 3*). Dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut ini, dengan nilai maksimum *power coefficient* (CoP) pada *curtain 1*.



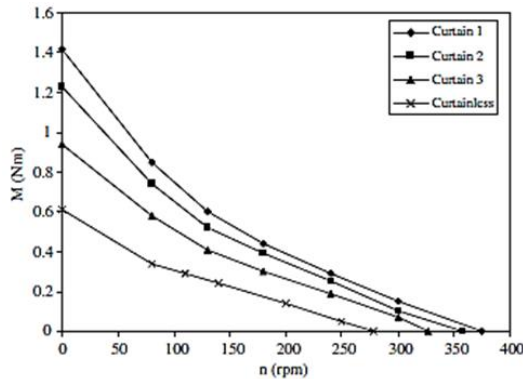
Gambar 2.14 Grafik Pengaruh Variasi Panjang Plat Pengganggu terhadap Nilai *Power Coefficient* (CoP) (Altan, et al., 2008)

Selain itu, penambahan plat pengganggu juga berpengaruh terhadap putaran turbin rotor Savonius, dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut ini. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa ketika sudut $\beta < 15^\circ$, putaran rotor menjadi rendah, hal ini juga terjadi ketika sudut $\beta > 15^\circ$.



Gambar 2.15 Grafik Pengaruh Putaran Turbin (n) terhadap Besar Sudut Plat (α dan β) pada *Curtain 1* (Altan, et al., 2008)

Berdasarkan gambar 2.15 diatas, dapat dilihat bahwa putaran maksimal diperoleh ketika sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Selain berpengaruh terhadap putaran turbin rotor Savonius, penambahan plat pengganggu juga berpengaruh terhadap nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor turbin Savonius. Pengaruh penambahan plat pengganggu terhadap nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor turbin Savonius dapat dilihat pada gambar 2.16 berikut ini.



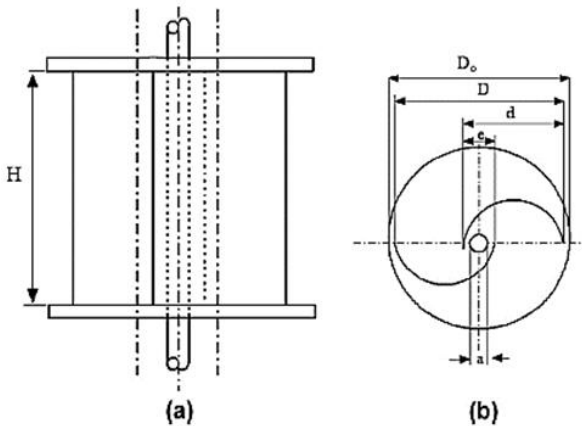
Gambar 2.16 Grafik Pengaruh Nilai Torsi yang Dihasilkan (M) terhadap Putaran Turbin (n) ($\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$) (Altan, et al., 2008)

Berdasarkan grafik-grafik diatas, hasil dari penelitian yang telah dilakukan menyatakan bahwa nilai dari *power coefficient* (CoP) turbin angin Savonius dapat meningkat sebesar 38,5 % apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu ℓ_1 sebesar 45 cm, ℓ_2 sebesar 52 cm, dan dengan sudut sudu pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

2.11.3 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengaruh Variasi Parameter Geometri dari Turbin Angin Savonius

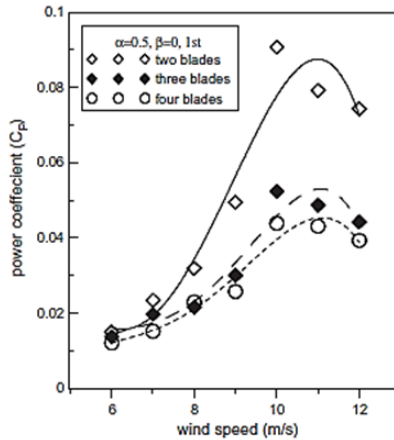
Studi eksperimen yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)** pada turbin angin Savonius dengan tujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan menggunakan pengaruh variasi parameter geometri dari turbin angin Savonius. Parameter geometri tersebut antara lain jumlah *blade*, *overlap ratio*, *aspect ratio*, jumlah *stage*, dan keberadaan *end plate*. Perbedaan parameter geometri turbin terletak pada jumlah *blade*, yaitu dengan dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b), dan empat *blade* (4b); jumlah *stage* turbin, yaitu dengan satu *stage* dan

dua *stage*; *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3 dan 0,35, *aspect ratio* yang digunakan adalah sebesar 0,5; 1; 2; 4 dan 5 dengan ada dan tidaknya *end plates* pada turbin angin Savonius. *Range* kecepatan yang digunakan pada penelitian ini adalah antara 0 - 13 m/s. Skema desain turbin angin Savonius pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.17 berikut ini.



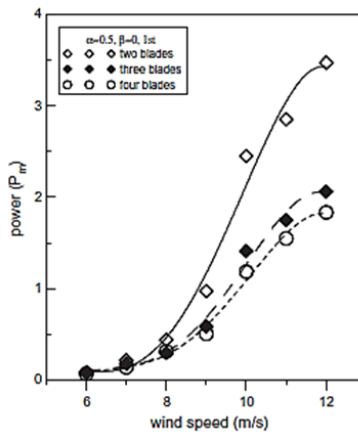
Gambar 2.17 Skema Turbin Angin Savonius
(Mahmoud, et al., 2010)

Material sudu yang digunakan adalah pipa PVC dengan besar diameter yang berbeda, yaitu 0,3; 0,2; 0,1 dan 0,08 m. Material *end plate* terbuat dari plat kayu dengan tebal 2,5 mm, dengan ukuran diameter *end plate* lebih besar 10% dari diameter turbin. Diameter poros turbin yang digunakan adalah sebesar 14 mm dengan panjang 62 cm. Dari studi eksperimen ini, diperoleh kesimpulan bahwa jumlah *blade* berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih tinggi daripada turbin dengan tiga *blade* atau empat *blade*, dapat dilihat pada gambar 2.18 berikut ini.



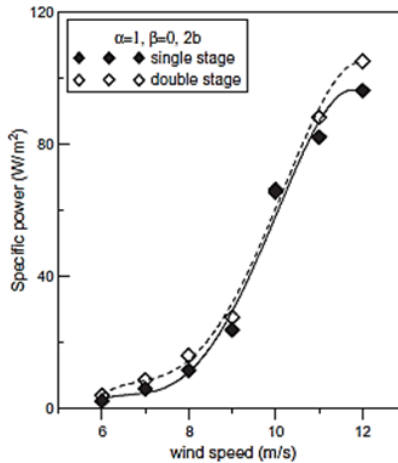
Gambar 2.18 Hubungan antara *Coefficient of power* (CoP) dan Kecepatan Angin pada Turbin (Mahmoud, et al., 2010)

Selain berpengaruh terhadap nilai *coefficient of power* (CoP), jumlah *blade* pada turbin angin juga berpengaruh terhadap daya aktual turbin, dapat dilihat pada gambar 2.19 berikut ini.



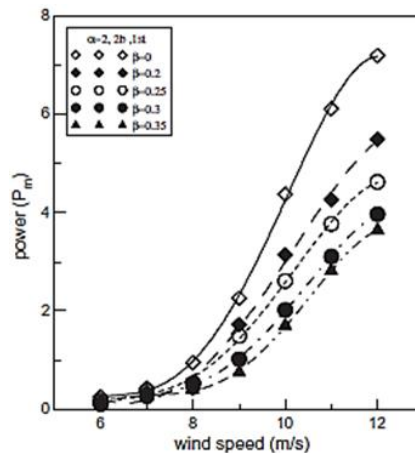
Gambar 2.19 Pengaruh Jumlah *Blade* pada *Power* Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)

Jumlah *stage* juga berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Pada studi eksperimen ini, jumlah *stage* yang digunakan adalah satu *stage* dan dua *stage*. Hasil yang diperoleh adalah bahwa nilai *power specific* turbin dengan dua *stage* lebih tinggi daripada satu *stage*, dapat dilihat pada gambar 2.20 berikut ini.



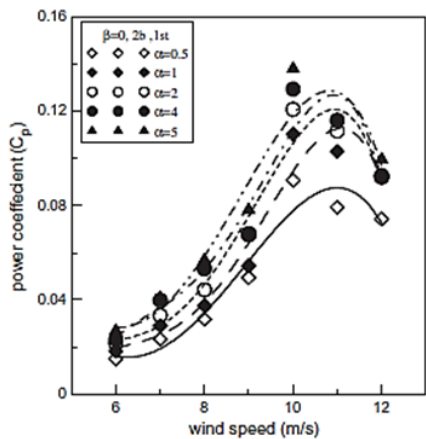
Gambar 2.20 Pengaruh Jumlah *Stage* Turbin pada *Specific Power* terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)

Selain jumlah *blade* dan jumlah *stage*, nilai *overlap ratio* juga berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Pada eksperimen ini, nilai *overlap ratio* divariasikan dari nilai 0 sampai 35 yang berpengaruh pada nilai daya aktual turbin terhadap kecepatan angin seperti pada gambar 2.21. Dapat dilihat bahwa nilai daya aktual pada turbin tanpa *overlap* lebih tinggi daripada turbin dengan *overlap*.

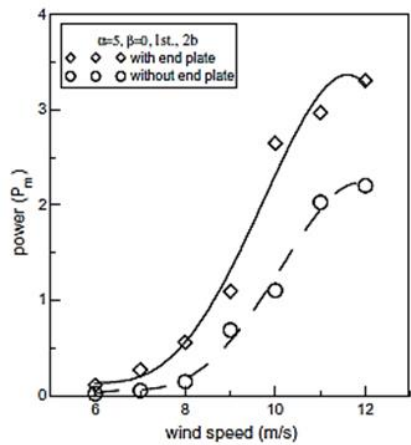


Gambar 2.21 Pengaruh *Overlap Ratio* pada *Power Turbin* terhadap *Kecepatan Angin* (Mahmoud, et al., 2010)

Studi eksperimen ini juga mempelajari pengaruh *aspect ratio* terhadap performa turbin angin Savonius. Nilai variasi *aspect ratio* yang digunakan mulai dari 0,5 sampai 5, dimana nilai tersebut berpengaruh pada nilai *coefficient of power* terhadap kecepatan angin. Didapatkan hasil bahwa nilai *coefficient of power* semakin naik seiring dengan kenaikan nilai *aspect ratio* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.22. Keberadaan *end plates* pada turbin juga berpengaruh pada performa turbin angin Savonius. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa turbin dengan *end plates* memiliki daya aktual yang lebih tinggi daripada turbin tanpa *end plates*. Grafik pengaruh adanya *end plates* pada turbin angin Savonius terhadap daya aktual turbin dapat dilihat pada gambar 2.23.



Gambar 2.22 Pengaruh Aspect Ratio pada Coefficient of power (CoP) terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)



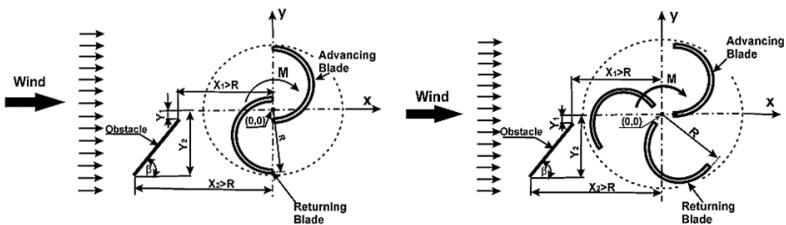
Gambar 2.23 Pengaruh End Plates pada Power Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud, et al., 2010)

Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih efisien daripada dengan tiga atau empat *blade*. Turbin dengan dua *stage* memiliki performa yang

lebih optimum dibanding turbin dengan satu *stage*, karena *specific power* turbin dengan dua *stage* lebih besar daripada turbin dengan satu *stage*. Selain itu, pengoperasian turbin angin Savonius tanpa *overlap ratio* lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan *overlap ratio*. *Coefficient of power* dari turbin akan meningkat seiring dengan kenaikan *aspect ratio* (α). Penggunaan *end plates* pada turbin akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa menggunakan *end plates*.

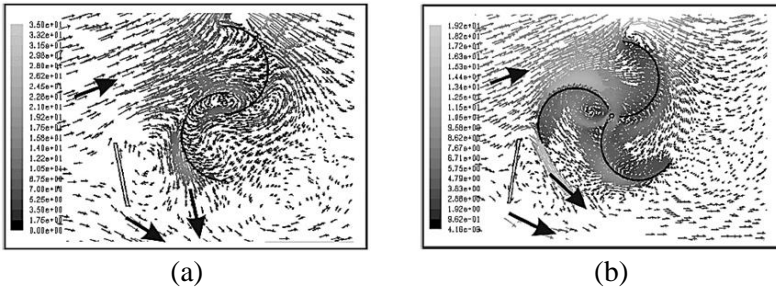
2.11.4 Optimalisasi Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengganggu berupa Plat Datar di Depan *Returning Blade*

Pada penelitian **Mohamed et al (2010)**, tentang peningkatan performa turbin angin Savonius menggunakan simulasi dengan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian ini dilakukan dengan memberikan pengganggu berupa plat datar di depan *returning blade*, dengan variasi besar sudut plat (β), *tip speed ratio* (λ), dan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/s. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan antara turbin angin tipe Savonius dua sudu dengan turbin angin tipe Savonius tiga sudu, yang masing-masing diberi pengganggu berupa plat datar di depan *returning blade* pada masing-masing turbin. Penyusunan plat penghalang dapat dilihat seperti gambar 2.24 berikut ini.



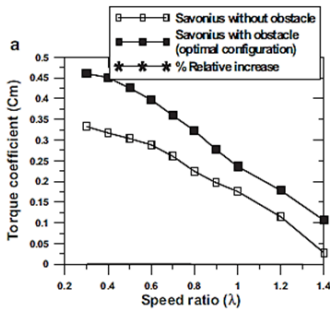
Gambar 2.24 Skema Susunan Plat Pengganggu pada Turbin Savonius Dua Sudu dan Tiga Sudu (Mohamed, et al., 2010)

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa jumlah sudu berpengaruh terhadap kemampuan *self starting* yang dimiliki oleh turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius dengan tiga sudu memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik dibandingkan turbin angin Savonius dengan dua sudu, dapat dilihat pada gambar 2.25 berikut ini.

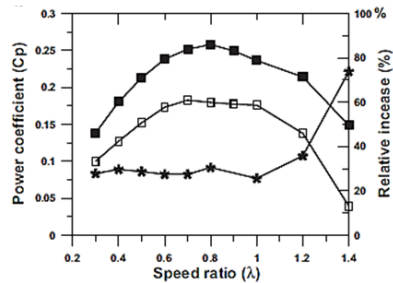


Gambar 2.25 Perbandingan Hasil Simulasi Struktur Aliran pada saat *Self Starting* dengan *Tip Speed Ratio* (λ) = 0,7 (a) Turbin Angin Savonius Dua Sudu (b) Turbin Angin Savonius Tiga Sudu (Mohamed, et al., 2010)

Selain berpengaruh pada kemampuan *self starting*, penambahan plat penghalang juga berpengaruh terhadap nilai *torque coefficient* dan nilai *power coefficient*. Didapatkan hasil simulasi bahwa *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin tipe Savonius dengan dua sudu dan dengan tiga sudu mempunyai peningkatan nilai CoP yang hampir sama. Pada turbin angin tipe Savonius dua sudu yang diberi pengganggu, didapatkan nilai *coefficient of power* (CoP) yang dapat meningkat hingga 27,3% pada besar sudut plat (β) = 100,83° serta *tip speed ratio* (λ) = 0,7. Sedangkan untuk turbin angin tipe Savonius dengan tiga sudu yang diberi pengganggu, didapatkan nilai *coefficient of power* (CoP) yang dapat meningkat hingga 27,5% pada besar sudut plat (β) = 80,52° serta *tip speed ratio* (λ) = 0,7. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar 2.26 dan 2.27 berikut ini.

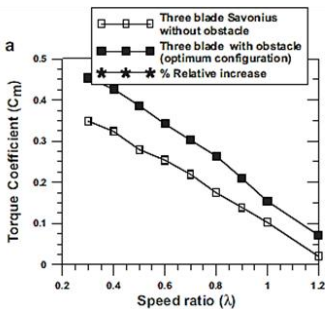


(a)

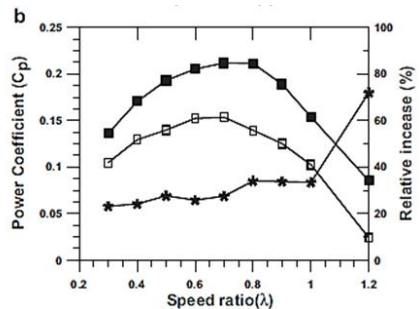


(b)

Gambar 2.26 Grafik Performa Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu (a) Hubungan antara *Tip Speed Ratio* dan *Torque Coefficient* (b) Hubungan antara *Tip Speed Ratio* dan *Power Coefficient* (CoP) (Mohamed, et al., 2010)



(a)



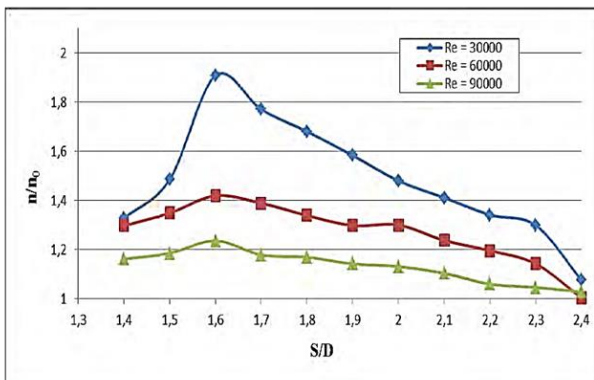
(b)

Gambar 2.27 Grafik Performa Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu (a) Hubungan antara *Tip Speed Ratio* dan *Torque Coefficient* (b) Hubungan antara *Tip Speed Ratio* dan *Power Coefficient* (CoP) (Mohamed, et al., 2010)

2.11.5 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi *Returning Blade* Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius

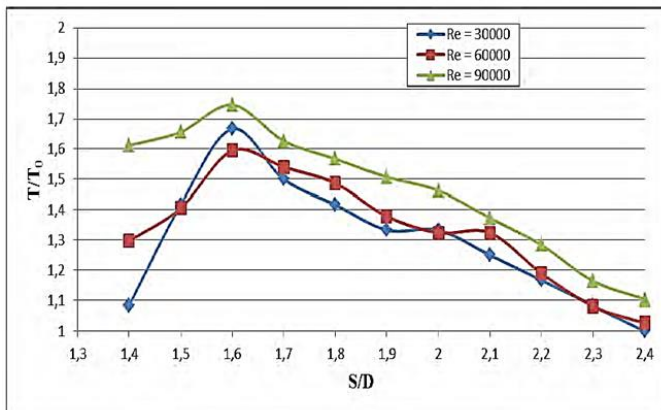
Daniel Fernando (2017), melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan sisi *returning blade*. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan rasio diameter silinder pengganggu (d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D), dan harga bilangan Reynolds. d/D yang digunakan adalah sebesar 0,75, variasi jarak silinder pengganggu terhadap sudu *returning blade* sebesar $1,5 \leq S/D \leq 2,4$, dan variasi Re sebesar $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$. Diameter (d) silinder sirkular pengganggu adalah 88,8 mm, dengan tinggi (L) sebesar 500 mm.

Didapatkan hasil bahwa penggunaan silinder pengganggu sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius efektif dalam meningkatkan performa turbin angin. Variasi jarak S/D yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin angin tipe Savonius. Dimana pada jarak $S/D = 1,6$ memiliki performa yang paling tinggi, dapat dilihat pada gambar 2.28 berikut.

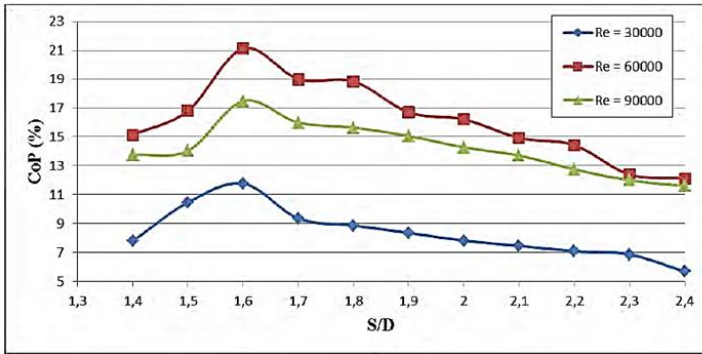


Gambar 2.28 Grafik Perbandingan Putaran antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tapa Silinder Pengganggu (n/n_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Fernando, 2017)

Berdasarkan gambar 2.28 diatas, dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds (Re) sebesar $3,0 \times 10^4$ menghasilkan perbandingan putaran dengan dan tanpa pengganggu (n/n_0) lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi bilangan Reynolds lainnya ($Re = 6,0 \times 10^4$ dan $Re = 9 \times 10^4$). Nilai tertinggi didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ dengan nilai maksimum peningkatan putaran sebesar 1,9 kali. Sedangkan perbandingan nilai torsi statis dengan dan tanpa penghalang (T/T_0) tertinggi dihasilkan pada bilangan Reynolds (Re) = $9,0 \times 10^4$ dan nilai tertinggi didapatkan pada jarak $S/D = 1,6$ dengan nilai peningkatan torsi statis sebesar 1,74 kali, dapat dilihat pada gambar 2.29. Penurunan torsi statis yang terjadi disebabkan karena jarak yang terlalu dekat yang akan mengakibatkan *shear layer* dari silinder pengganggu akan efektif mengganggu *boundary layer* dari sudu *returning blade* turbin angin Savonius. Sedangkan semakin jauh jarak, maka *shear layer* tersebut tidak akan efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*.



Gambar 2.29 Grafik Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tapa Silinder Pengganggu (T/T_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Fernando, 2017)

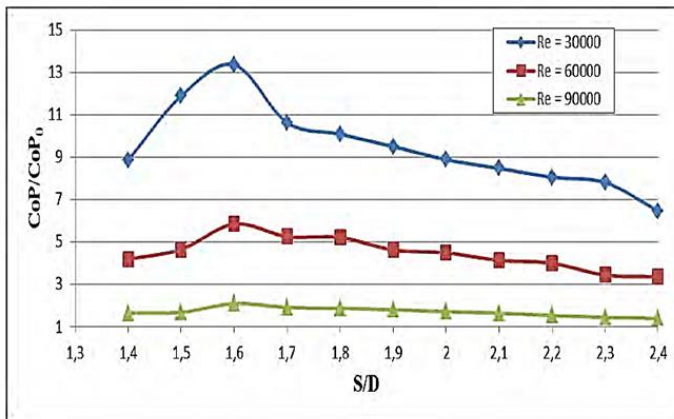


Gambar 2.30 Grafik *Coefficient of power* Turbin Angin Savonius Berpengganggu sebagai Fungsi Jarak pada $S/D=1,4 -2,4$ (Fernando, 2017)

Gambar 2.30 menunjukkan grafik *coefficient of power* turbin angin Savonius dengan pengganggu silinder sirkular dengan diameter (d) = 88,8 mm. Grafik tersebut ditampilkan dalam nilai *coefficient of power* sebagai fungsi S/D . Dari gambar diatas memperlihatkan bahwa pada jarak S/D yang sama, seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds, maka *coefficient of power* dari turbin angin Savonius berpengganggu semakin rendah. Pada jarak $S/D = 1,6$; nilai *coefficient of power* pada bilangan Reynolds $6,0 \times 10^4$ adalah sebesar 21,125 %, sedangkan pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ nilai *coefficient of power* sebesar 17,48 %, dan pada bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$ nilai *coefficient of power* sebesar 11,77 %.

Pada grafik diatas juga memperlihatkan bahwa pada bilangan Reynolds $6,0 \times 10^4$; 9×10^4 dan $3,0 \times 10^4$ nilai *coefficient of power* mengalami kenaikan dan penurunan. Pada jarak $S/D = 1,4$ sampai dengan 1,6 nilai *coefficient of power* mengalami kenaikan. Hal ini dikarenakan penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat mengurangi gaya *drag* pada sudu *returning blade*. Dengan adanya penambahan pengganggu menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu memberikan gangguan

terhadap *boundary layer returning blade*. Sehingga *boundary layer returning blade* terganggu dan mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen. Hal ini mengakibatkan torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* juga akan turun, membuat selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* akan semakin besar. Hal ini dapat meningkatkan daya yang dihasilkan oleh turbin. Sedangkan pada jarak S/D 1,6 sampai dengan 2,4 nilai *coefficient of power* mengalami penurunan. Selain pengaruh silinder pengganggu, variasi jarak juga memberikan efek pada *returning blade*.



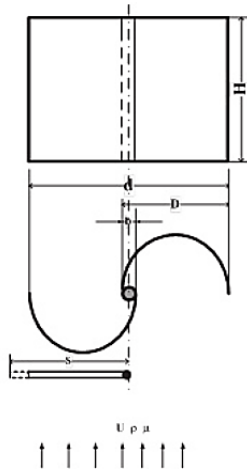
Gambar 2.31 Grafik Perbandingan *Coefficient of power* antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D=1,4 - 2,4$ (Fernando, 2017)

Gambar 2.31 menunjukkan grafik perbandingan CoP pada S/D sebesar 1,4 - 2,4 dan dibandingkan dengan data CoP tanpa adanya penghalang (CoP_0). Pada $Re = 3 \times 10^4$, nilai CoP turbin dengan pengganggu memiliki nilai kenaikan terbesar yaitu 13,35 kali atau memiliki kenaikan performa (*relative increasement*) sebesar 1235% dari CoP turbin tanpa pengganggu. Sementara untuk

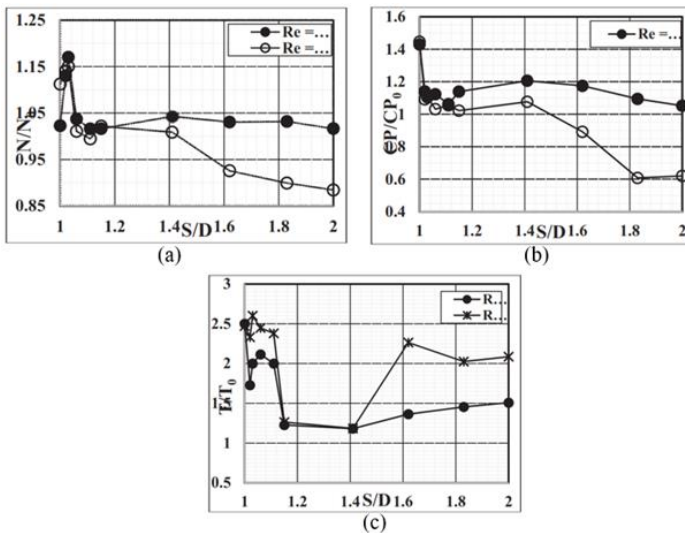
$Re = 6 \times 10^4$ kenaikan maksimal dari *Coefficient of power* sebesar 5,83 kali atau memiliki kenaikan performa (*relative increasement*) sebesar 483% dan pada $Re = 9,0 \times 10^4$ kenaikan maksimal dari *Coefficient of power* sebesar 2,08 kali atau memiliki kenaikan performa (*relative increasement*) sebesar 108%. Pada ketiga nilai bilangan Reynolds yang diteliti, nilai CoP/CoP_0 mempunyai nilai diatas satu. Dari hal ini dapat disimpulkan adanya penghalang berupa silinder sirkuler pada bagian depan sudu *returning blade* turbin angin Savonius dengan perbandingan d/D (perbandingan diameter silinder sirkuler penganggu dengan diameter turbin angin Savonius) sebesar 0,75 terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin tipe Savonius.

2.11.6 Studi Eksperimen Pengaruh Lebar *Single Curtain* terhadap Performa Turbin Angin Savonius

Penelitian yang dilakukan oleh **Triyogi Yuwono et al (2018)**, pengaruh lebar plat terhadap performa turbin angin Savonius. Penelitian ini menggunakan turbin Savonius dari pipa PVC yang berdiameter (D) sebesar 102 mm dan memiliki tinggi (H) sebesar 300 mm. Plat yang digunakan dari plastik dengan ketebalan 3 mm dan memiliki tinggi 300 mm. Penelitian ini menggunakan variasi S/D sebesar 1,00; 1,02; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83 dan 2,0, seperti pada gambar 2.24. Penelitian ini menggunakan bilangan Reynolds sebesar 3×10^4 dan 9×10^4 . Penelitian ini dilakukan dengan skema seperti pada gambar 2.32 berikut ini.



Gambar 2.32 Skema Penelitian (Yuwono, et al., 2018)

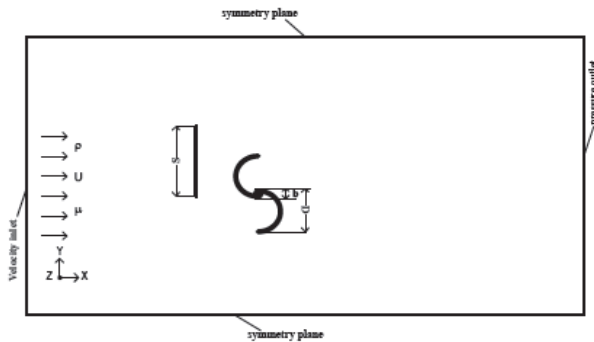


Gambar 2.33 Perbandingan Turbin dengan Plat dan Turbin tanpa Plat terhadap Fungsi S/D , $Re = 3 \times 10^4$ dan 9×10^4 (a) Putaran (N/N_0) (b) Coefficient of Power (CoP/CoP_0) (c) Torsi Statis (TS/TS_0) (Yuwono, et al., 2018)

Hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.33. Penambahan plat di depan *returning blade* efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius, pada $Re = 3 \times 10^4$ dan 9×10^4 meningkatkan putaran ($N/N_0 > 1$), *coefficient of power* ($CoP/CoP_0 > 1$), dan torsi statis ($T_s/T_{s0} > 1$). Kecuali Pada $Re = 9 \times 10^4$ dengan $S/D > 1,41$ putaran menurun ($N/N_0 < 1$) dan *coefficient of power* ($CoP/CoP_0 < 1$). Dan penurunan CoP terbesar pada $S/D = 1,83$ dimana nilai CoP dengan plat menurun 60,8% jika dibandingkan dengan tanpa plat.

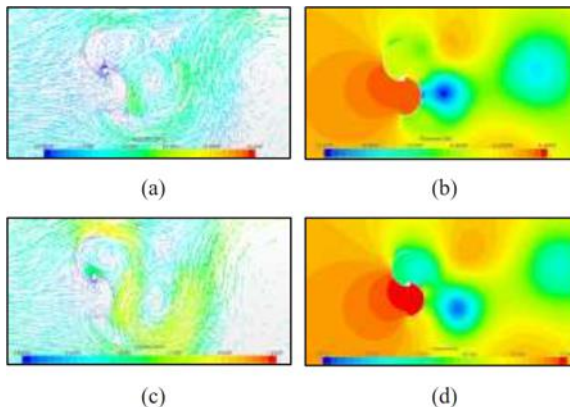
2.11.7 Studi Numerik Pengaruh Lebar *Single Curtain* terhadap Performa Turbin Angin Savonius

Penelitian yang dilakukan oleh **Triyogi Yuwono et al (2018)**, pengaruh lebar *curtain* terhadap performa turbin angin Savonius dengan menggunakan *STAR CCM++ Software* untuk simulasi karakteristik aliran disekitar turbin Savonius. Simulasi dengan menggunakan *k-ε realizable turbulence model* dan turbin Savonius statis atau tidak bergerak untuk mengetahui fenomena aliran fluida disekitar turbin Savonius. Simulasi ini menggunakan bilangan Reynolds sebesar 3×10^4 dan 9×10^4 sesuai dengan kecepatan angin sebesar 2,48 m/s dan 7,45 m/s. Penelitian ini menggunakan variasi perbandingan lebar plat dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,00; 1,02; 1,03; 1,15; 1,41 dan 2,00. Simulasi ini menggunakan *boundary conditions*, seperti pada gambar 2.34.

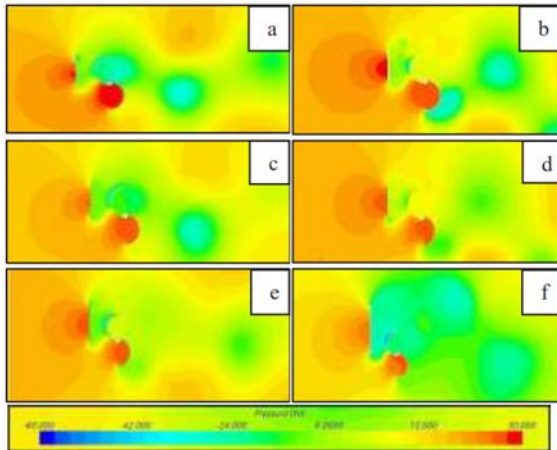


Gambar 2.34 Skema Pemodelan Domain (Yuwono, et al., 2018)

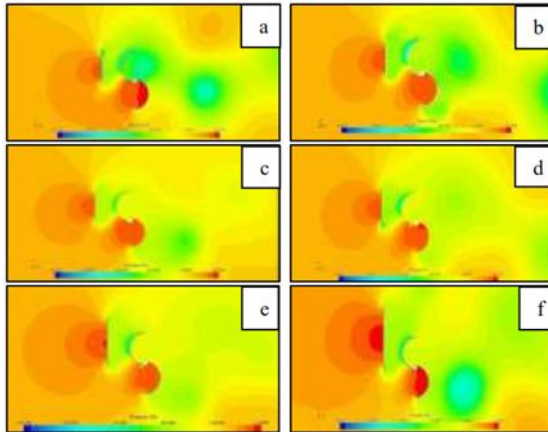
Hasil dari penelitian ini, pada gambar 2.35 dapat dilihat bahwa torsi statis $Re = 9 \times 10^4$ lebih besar dari pada $Re = 3 \times 10^4$. Penambahan plat di depan *returning blade* efektif meningkatkan performa turbin Savonius. Tetapi $S/D = 2,0$ pada $Re = 9 \times 10^4$ tidak efektif meningkatkan performa turbin Savonius. Ini dapat dilihat pada kontur tekanan, seperti gambar 2.36 dan 2.37.



Gambar 2.35 Aliran Fluida di Sekitar Turbin Savonius Tanpa Plat, $Re = 3 \times 10^4$ (a) *Velocity Vector* (b) *Pressure Countur* dan $Re = 9 \times 10^4$ (c) *Velocity Vector* (d) *Pressure Countur* (Yuwono, et al., 2018)



Gambar 2.36 Kontur Tekanan di Sekitar Turbin Savonius dengan Plat, $Re = 3 \times 10^4$ (a) $S/D = 1,00$ (b) $S/D = 1,02$ (c) $S/D = 1,03$ (d) $S/D = 1,15$ (e) $S/D = 1,41$ (f) $S/D = 2,0$ (Yuwono, et al., 2018)

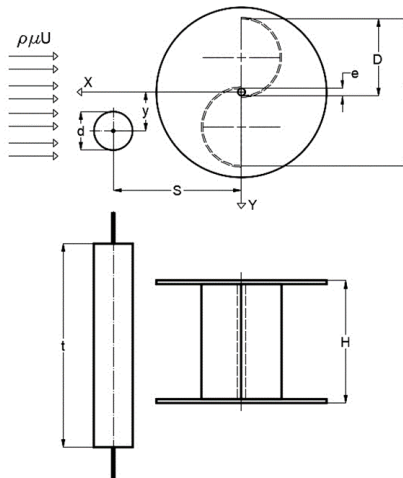


Gambar 2.37 Kontur Tekanan di Sekitar Turbin Savonius dengan Plat, $Re = 9 \times 10^4$ (a) $S/D = 1,00$ (b) $S/D = 1,02$ (c) $S/D = 1,03$ (d) $S/D = 1,15$ (e) $S/D = 1,41$ (f) $S/D = 2,0$ (Yuwono, et al., 2018)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Analisa Dimensi

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui parameter-parameter apa saja yang berpengaruh terhadap hasil penelitian dan yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius berpengganggu silinder sirkular dengan diameter tertentu. Pada penelitian ini, parameter yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida adalah massa jenis fluida (ρ), viskositas dinamis fluida (μ), kecepatan aliran fluida (U), diameter sudu turbin Savonius (D), diameter turbin Savonius (L), tinggi turbin Savonius (H), diameter silinder pengganggu (d), panjang silinder pengganggu (t), jarak silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (y), jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S), kecepatan sudut turbin angin Savonius (ω), dan diameter poros (e). Skema penelitian dan parameter-parameter pengujian dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Skema Penelitian dan Parameter Pengukuran

dimana:

ρ	= Massa jenis fluida (kg/m ³)
μ	= Viskositas dinamis fluida (N.s/m ²)
U	= Kecepatan aliran fluida (m/s)
D	= Diameter sudu turbin angin Savonius (m)
L	= Diameter turbin angin Savonius (m)
H	= Tinggi turbin angin Savonius (m)
d	= Diameter silinder pengganggu (m)
t	= Panjang silinder pengganggu (m)
y	= Jarak silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
e	= Diameter poros (m)
S	= Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)
ω	= Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

3.1.1 Analisa Dimensi *Coefficient of power*

Metode analisa yang digunakan untuk analisa dimensi nilai *coefficient of power* adalah dengan mengaplikasikan *Buckingham-Phi Theorem*. Di bawah ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan untuk analisa dimensi nilai *coefficient of power*.

1. Menentukan parameter-parameter yang berpengaruh.
Parameter-parameter yang berpengaruh adalah sebagai berikut.

$$P = f(\rho, \mu, U, D, H, d, t, y, e, S, \omega)$$

Jumlah parameter (x) = 12 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

$P = \text{Power (J/s)}$

$\rho = \text{Massa jenis fluida (kg/m}^3\text{)}$

$\mu = \text{Viskositas dinamis fluida (N.s/m}^2\text{)}$

$U = \text{Kecepatan aliran fluida (m/s)}$

$D = \text{Diameter sudu turbin angin Savonius (m)}$

$H = \text{Tinggi turbin angin Savonius (m)}$

$d = \text{Diameter silinder pengganggu (m)}$

$t = \text{Panjang silinder pengganggu (m)}$

- y = Jarak silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
 e = Diameter poros (m)
 S = Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)
 ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

2. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih
 Berikut merupakan dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Tabel 3.1 Dimensi Primer Parameter

Parameter	P	ρ	μ	U	D	H	d	t	y	e	S	ω
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

3. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan
 Menggunakan *Buckingham-Phi Theorem* dengan parameter ρ , U , D dan diperoleh 9 grup tanpa dimensi yaitu:

1. $\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$: Coefficient of power
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$: Bilangan Reynolds
3. $\pi_3 = \frac{H}{D}$: Rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius.
4. $\pi_4 = \frac{d}{D}$: Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius.
5. $\pi_5 = \frac{t}{D}$: Rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius.

6. $\pi_6 = \frac{y}{D}$: Rasio posisi silinder penghalang yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius.
7. $\pi_7 = \frac{e}{D}$: Rasio diameter poros dengan diameter sudu turbin angin Savonius.
8. $\pi_8 = \frac{S}{D}$: Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius
9. $\pi_9 = \frac{D\omega}{U}$: *Tip Speed Ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{t}{D}, \frac{y}{D}, \frac{e}{D}, \frac{S}{D}, \frac{D\omega}{U} \right)$$

Pada penelitian ini $\frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{t}{D}, \frac{e}{D}, \frac{S}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}, \frac{D\omega}{U}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap nilai *coefficient of power* pada turbin angin Savonius, sehingga:

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2 \left(\frac{y}{D}, \frac{\mu}{\rho U D}, \frac{D\omega}{U} \right)$$

Dalam hal ini, nilai D sebanding dengan nilai L, yaitu $L=2D-e-2x$, dengan nilai e tetap maka didapatkan:

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_3 \left(\frac{y}{D}, \frac{\mu}{\rho U L}, \frac{D\omega}{U} \right)$$

atau,

$$CoP = f_4 \left(\frac{y}{D}, Re, TSR \right)$$

3.1.2 Analisa Dimensi *Coefficient of Moment*

Metode yang digunakan dalam analisa dimensi *coefficient of moment* adalah *Buckingham-Phi Theorem*. Langkah-langkah dalam analisa dimensi *coefficient of moment* adalah sebagai berikut.

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi torsi

$$T = f(\rho, \mu, U, D, d, S, y, H, t, e, \omega)$$

Jumlah parameter (x) = 12 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

$$T = \text{Torsi (Nm)}$$

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

μ = Viskositas dinamis fluida (Ns/m²)

U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

D = Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

d = Diameter silinder pengganggu (m)

S = Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)

y = Jarak silinder penghalang dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)

$$H = \text{Tinggi turbin angin Savonius (m)}$$

t = Panjang silinder pengganggu (m)

$$e = \text{Diameter poros (m)}$$
$$\omega = \text{Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)}$$

2. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih
Berikut merupakan dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Tabel 3.2 Dimensi Primer Parameter

Parameter	T	ρ	μ	U	D	d	S	y	H	t	e	ω
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^2}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

3. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan Menggunakan *Buckingham-Phi Theorem* dengan parameter ρ , U , D dan diperoleh 9 grup tanpa dimensi yaitu:

1. $\pi_1 = \frac{T}{\rho U^2 D^3}$: *Coefficient of power*
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$: *Bilangan Reynolds*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D}$: *Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius.*
4. $\pi_4 = \frac{S}{D}$: *Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius.*
5. $\pi_5 = \frac{y}{D}$: *Rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius.*
6. $\pi_6 = \frac{H}{D}$: *Rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius.*
7. $\pi_7 = \frac{t}{D}$: *Rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius.*
8. $\pi_8 = \frac{e}{D}$: *Rasio diameter poros dengan diameter sudu turbin angin Savonius.*
9. $\pi_9 = \frac{D \omega}{U}$: *Tip Speed Ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$

$$\frac{T}{\rho U^2 D^3} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{e}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Pada penelitian ini $\frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{e}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Moment* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{T}{\rho U^2 D^3} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Dalam hal ini, nilai D sebanding dengan L, untuk $L = 2D - e - 2x$, dengan nilai e tetap maka didapatkan:

$$\frac{T}{\rho U^3 D^2} = f_3 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

atau,

$$C_m = f_4 \left(Re, \frac{y}{D}, TSR \right)$$

3.2 Peralatan Eksperimen

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan guna menunjang pengambilan data eksperimen. Peralatan tersebut antara lain sebagai berikut.

3.2.1 Axial Fan

Penelitian ini menggunakan *axial fan* sebagai sumber angin. *Axial fan* ini berfungsi untuk memutar turbin angin Savonius, yang kecepatannya diatur dengan mekanisme tambahan sesuai kebutuhan. *Axial fan* yang digunakan adalah **CKE SPV-18**, dengan kecepatan maksimal yang dihasilkan adalah sebesar 13,087 m/s. *Axial fan CKE SPV-18* ditunjukkan oleh gambar 3.2 berikut ini.



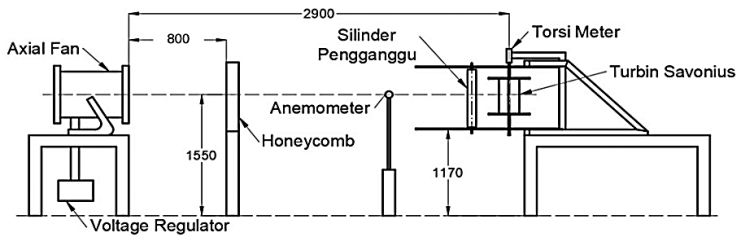
Gambar 3.2 *Axial Fan CKE SPV-18*

Spesifikasi dari *Axial Fan CKE SPV-18* dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Spesifikasi *Axial Fan CKE SPV-18*

<i>SPECIFICATIONS</i>	
<i>Diameter</i>	18 inch / 450 mm
<i>Speed</i>	2850 RPM
<i>Air Flow</i>	4413 CFM
<i>Power</i>	1700 Watt
<i>Static Press</i>	520 Pa
<i>Phase</i>	1
<i>Voltage</i>	220 – 240 V

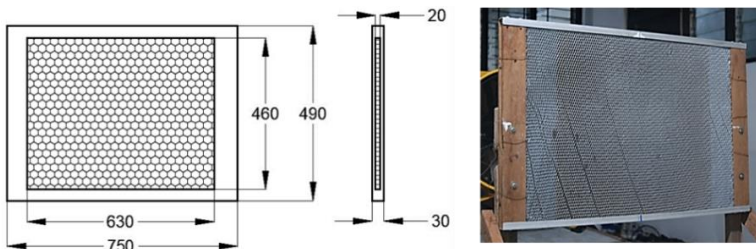
Skema penelitian yang dilakukan adalah dengan meletakkan *axial fan* dengan jarak 2900 mm di depan turbin angin Savonius dan 800 mm di depan *honeycomb*, dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3.3 Skema Susunan Peralatan Penelitian dan Dimensi Alat (dalam mm)

3.2.2 *Honeycomb*

Penelitian ini menggunakan *honeycomb* untuk menyearahkan aliran angin yang dihasilkan oleh *axial fan* menuju turbin angin Savonius. Fungsi dari *honeycomb* adalah mencegah terjadinya *swirl* (fluktuasi kecepatan aliran angin). *Honeycomb* diletakkan diantara *axial fan* dan benda uji seperti pada gambar 3.3 diatas. Bentuk dan dimensi dari *honeycomb* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 *Honeycomb* (dalam mm)

Spesifikasi dari *honeycomb* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Panjang sisi *frame* : 750 mm
- Panjang sisi *honeycomb* : 460 mm
- Tebal *frame* : 30 mm
- Tebal *honeycomb* : 20 mm
- *Meshing size* : 0,025 lubang/mm²

3.2.3 Benda Uji

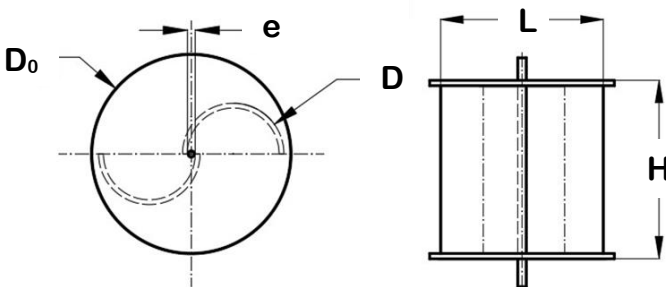
Penelitian ini menggunakan turbin angin tipe Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular. Berikut merupakan profil atau spesifikasi dari turbin angin Savonius dan silinder pengganggu yang digunakan dalam penelitian (diukur menggunakan jangka sorong).

a. Profil turbin angin Savonius

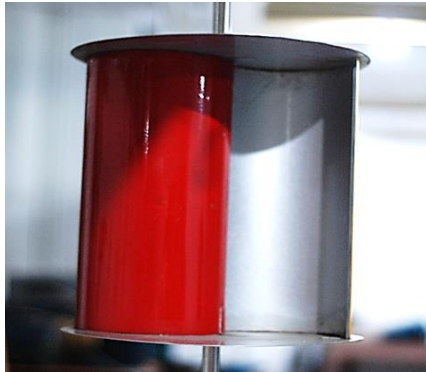
Profil turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bahan turbin : Pipa PVC
- Bahan *end plates* : Alumunium Cladding 2024
- Diameter sudu turbin (D) : 165,2 mm
- Tinggi (H) : 294,4 mm
- Diameter turbin ($L = 2D - e - 2x$) : 303,4 mm
- Diameter poros (e) : 19 mm
- Diameter *end plates* (D_0) : 321 mm
- Tebal *end plates* : 1,3 mm
- Tebal sudu turbin : 4 mm
- Massa total turbin : 1,546 kg
- Momen inersia turbin : 0,0355 kg.m²

Turbin angin Savonius yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada gambar 3.5 dan 3.6 berikut.



Gambar 3.5 Skema Turbin Angin Savonius



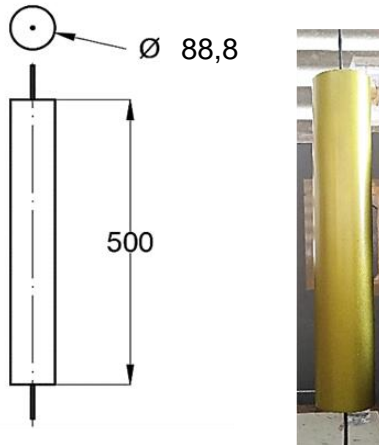
Gambar 3.6 Turbin Angin Savonius

b. Profil silinder pengganggu

Profil silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Diameter silinder pengganggu (d) : 88,8 mm
- Tinggi silinder pengganggu (t) : 500 mm
- Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) : 1,4.
- Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S) : 231,3 mm.
- Variasi rasio posisi silinder penghalang yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) : 0,0 ; 0,25 ; 0,5.

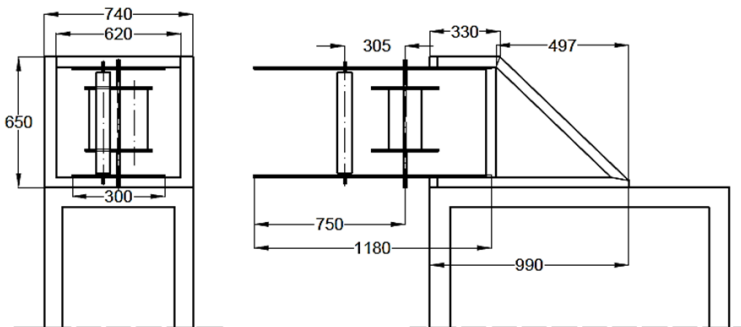
Silinder pengganggu yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Silinder Pengganggu dan Dimensinya (dalam mm)

3.2.4 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini digunakan sebuah penyangga sebagai tempat diletakkannya turbin angin Savonius dan silinder pengganggu. Benda uji dan silinder pengganggu disusun seperti pada gambar 3.8 berikut ini.



Gambar 3.8 Skema Penyangga Turbin Angin Savonius (dalam mm)

3.2.5 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (Nm) yang dihasilkan oleh turbin Savonius. Alat ukur tersebut antara lain:

a. *Anemometer*

Anemometer adalah suatu alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang dihasilkan oleh *axial fan*. Pada penelitian ini menggunakan **Omega HHF141 Digital Anemometer** seperti pada gambar 3.9. Pengukuran dapat dilakukan dalam beberapa satuan pengukuran yaitu ft/min, mph, knots, meter/s dan km/h. Alat ini dapat mengukur temperatur udara dalam satuan °F dan °C. Anemometer ini memiliki tingkat keakurasian yang tinggi $\pm 1,0\%$.



Gambar 3.9 Omega HHF141 *Digital Anemometer*

Spesifikasi *anemometer* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Omega HHF141 *Digital Anemometer*

SPECIFICATIONS	
Accuracy	AP275: +/- 1.0% of <i>reading</i> +/- 1 digit AP100: +/- 0.5% of F.S. +0.75% of <i>reading</i> + 1 digit
Resolutions	0.01 m/sec
Display	0.5 inch LCD, 4 digits
Air Flow	
Range	Resolution
AP100	1,5 to 35,00 m/sec
2,75 inch	0,2 to 40,00 m/sec
Temperature	
Operating Type	Temperature
Instrument	0 to 50°C
Probes	-20 to 100°C

b. *Tachometer*

Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek atau benda. *Tachometer* yang digunakan adalah ***Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT13***, seperti pada gambar 3.10. Dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit dengan *range* pengukuran antara 5 hingga 99.999 rpm.

**Gambar 3.10** *Tachometer* OMEGA seri HHT12

Spesifikasi *tachometer* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Spesifikasi *Tachometer* OMEGA seri HHT12

SPECIFICATIONS	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0,01 % of reading or ± 1 digit
Resolution	0,001 to 1,0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max, min and last
Power	2 "AA" 1,5 V dc batteries
Environmental	5 to 40° C

c. *Torque Meter*

Torque Meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari suatu poros atau suatu benda yang berputar. *Torque Meter* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu ***Torque Meter LUTRON model TQ-8800*** *high resolution* dengan ketelitian 0,1 Newton-cm, seperti pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 *Torque Meter* LUTRON Model TQ-8800

Spesifikasi *Torque Meter* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 Spesifikasi *Torque Meter* LUTRON Model TQ-8800

DISPLAY UNIT/RESOLUTION				
Unit	Max. range	High resolution	Low resolution	Over load protection range
Kg-cm	15 Kg-cm	0.01 kg-cm	0.1 Kg-cm	22.5 Kgf-cm max.
LB-inch	12.99 LB-inch	0.01 LB-inch	0.1 LB-inch	19.53 LBf-inch max.
Newton-cm	147.1 Newton-cm	0.1 Newton-cm	1 Newton-cm	220.1 N-cm max.

d. *Multimeter*

Multimeter digunakan untuk mengukur besarnya voltase yang digunakan untuk menggerakan *axial fan*. Hal ini bertujuan untuk menjaga aliran asupan daya listrik yang dialirkan ke *axial fan* agar terjaga konstan. *Multimeter* yang digunakan adalah **SANWA PC7000 Digital Multimeter** sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 SANWA PC7000 *Digital Multimeter*

Adapun spesifikasi detail SANWA PC7000 *Digital Multimeter* dapat dilihat pada Tabel 3.7 berikut ini.

Tabel 3.7 *Digital Multimeter SANWA PC7000*

SPECIFICATIONS	
Measurement Type	ACV
Range	500mV – 1000V
Best Accuracy	$\pm(0,5\%+40)$
Resolution	0,01 mV
Input Impedance	10M Ω
Bandwith	V: 1kHz – 20kHz (below 500V) A: 40Hz – 1kHz
Size	184 x 86 x 52 mm

3.2.6 Voltage Regulator

Pada penelitian ini menggunakan *voltage regulator* untuk mengatur besar keluaran tegangan yang dibutuhkan saat penelitian. *Voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah **Voltage Regulator Model TDGC 2J-3** seperti pada gambar 3.13 berikut ini.

**Gambar 3.13** *Voltage Regulator*

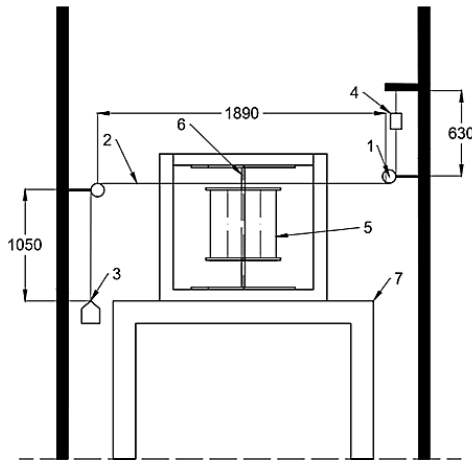
Spesifikasi *voltage regulator* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.8 berikut.

Tabel 3.8 Spesifikasi *Voltage Regulator* Model TDGC 2J-3

SPECIFICATIONS	
Model	TDGC 2J-3
Input	110/220 V
Output	0 – 250 V
Frequency	50 – 60 Hz
I Max	4,8/12 A
Cap.	3 KVA

3.2.7 *Brake dynamometer*

Brake dynamometer merupakan suatu sistem yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis dari suatu benda yang berputar. Pada penelitian ini menggunakan skema *brake dynamometer* seperti pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Skema *Brake Dynamometer* (1) katrol, (2) benang, (3) beban pemberat, (4) pegas, (5) turbin angin Savonius, (6) poros, (7) penyangga

Pada sistem *brake dynamometer* ini menggunakan **Pegas NAGATA** seperti pada gambar 3.15 dengan spesifikasi pada tabel 3.9.



Gambar 3.15 Neraca Pegas NAGATA

Tabel 3.9 Spesifikasi pegas NAGATA

SPESIFIKASI	
Tipe	Nagata C-5
Kapasitas	10 kg
Akurasi	50 gram

Sedangkan beban pemberat yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Anak Timbangan NHK tipe M-1** seperti pada gambar 3.16 berikut ini.



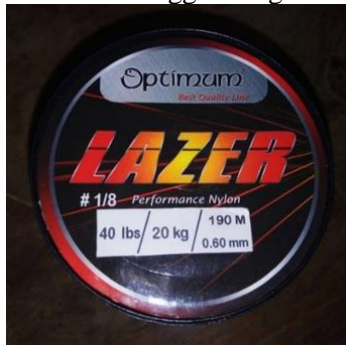
Gambar 3.16 Massa Pemberat Anak Timbangan NHK tipe M-1

Adapun spesifikasi dari anak timbangan yang digunakan dalam penelitian ini seperti pada tabel 3.10 berikut ini.

Tabel 3.10 Spesifikasi Anak Timbangan NHK tipe M-1

SPESIFIKASI								
Berat (g)	1	2	5	10	20	50	100	200
Toleransi (\pm) mg	1,0	1,2	1,5	2	2,5	3,0	5	10

Untuk menghambat putaran dari poros turbin angin Savonius, digunakan benang **Nylon Optimum LAZER** seperti pada gambar 3.17 yang menghubungkan antara pegas dengan beban pemberat. Benang *nylon optimum LAZER* berdiameter 0,60 mm mampu menahan beban hingga 20 kg.

**Gambar 3.17** Benang *Nylon Optimum LAZER*

3.2.8 Pelumas

Fungsi utama dari pelumas adalah untuk mengurangi atau mencegah keausan dan mencegah gesekan pada suatu sistem. Selain itu, pelumas juga berfungsi sebagai media pendingin, mencegah korosi atau karat, dan sebagai pembersih. Pada penelitian ini, pelumas digunakan untuk mengurangi gesekan pada bagian-bagian tertentu benda uji, sehingga dapat mengurangi kerugian yang terjadi. Pelumas yang digunakan pada penelitian ini adalah **WD-40 Multi-Use Product**, seperti pada gambar 3.18 berikut, diaplikasikan untuk melumasi *bearing* pada turbin angin Savonius setiap pengambilan data.



Gambar 3.18 *WD-40 Multi-Use Product*

Spesifikasi *WD-40 Multi-Use Product* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.11 berikut.

Tabel 3.11 Spesifikasi Pelumas *WD-40 Multi-Use Product*

<i>SPECIFICATIONS</i>	
<i>Code</i>	M6271
<i>Name</i>	<i>WD-40 Multi-Use Product</i>
<i>Type</i>	<i>Lubricant 191 ML/155 G/6.5 FL. OZ.</i>
<i>Weight</i>	0,3 Kg

3.3 Langkah Pengukuran

Penelitian ini dilakukan dengan prosedur atau urutan yang akan dijelaskan pada sub bab 3.3.1 dan sub bab 3.3.2 yang akan menjelaskan prosedur penelitian melalui diagram alir (*flowchart*). Berikut penjelasannya:

3.3.1 Prosedur Penelitian

3.3.1.1 Prosedur Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

Prosedur yang dilakukan dalam pengambilan data putaran dan torsi dinamis pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section*.

3. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar voltase yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai yang diharapkan.
4. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan *termometer*.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan *anemometer* pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$.
6. Setelah kecepatan angin *steady*, kemudian melakukan pengukuran kecepatan putaran poros tanpa silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *tachometer*.
7. Melakukan pengukuran torsi dinamis tanpa silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *brake dynamometer*.
8. Menambahkan massa pemberat untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 10 gr, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$ sebesar 20 gr.
9. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
10. Mengukur massa di neraca pegas untuk nilai torsi dinamis.
11. Mengulangi langkah 8 sampai 10 hingga turbin angin Savonius berhenti berputar.
12. Mengulangi langkah 5 sampai 11 dengan mengubah bilangan Reynolds = $14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$.
13. Meletakkan pengganggu dengan mengatur jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) sebesar 1,4 dan posisi silinder penghalang yang tegak lurus arah datangnya angin terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0.
14. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan *anemometer* pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$.
15. Setelah kecepatan angin *steady*, kemudian melakukan pengukuran kecepatan putaran poros dengan silinder

pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *tachometer*.

16. Melakukan pengukuran torsi dinamis dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *brake dynamometer*.
17. Menambahkan massa pemberat untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 10 gr, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$ sebesar 20 gr.
18. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *Tachometer*.
19. Mengukur massa di neraca pegas untuk nilai torsi dinamis.
20. Mengulangi langkah 17 sampai 19 hingga turbin angin Savonius berhenti berputar.
21. Mengulangi langkah 14 sampai 20 dengan mengubah bilangan Reynolds = $14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$.
22. Mengulangi langkah 13 sampai 21 dengan mengubah variasi y/D menjadi 0,25 dan 0,5.
23. Mematikan *axial fan*.
24. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran (n) sebagai fungsi *Reynolds number* (Re), grafik *coefficient of power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ), dan grafik *coefficient of moment* (C_m) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ).

3.3.1.2 Prosedur Menentukan Torsi Statis

Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data torsi statis sebagai berikut.

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasak benda uji pada *test section*.
3. Menentukan variasi sudut tubin angin Savonius (θ) sebesar 0° .
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar voltase yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator*

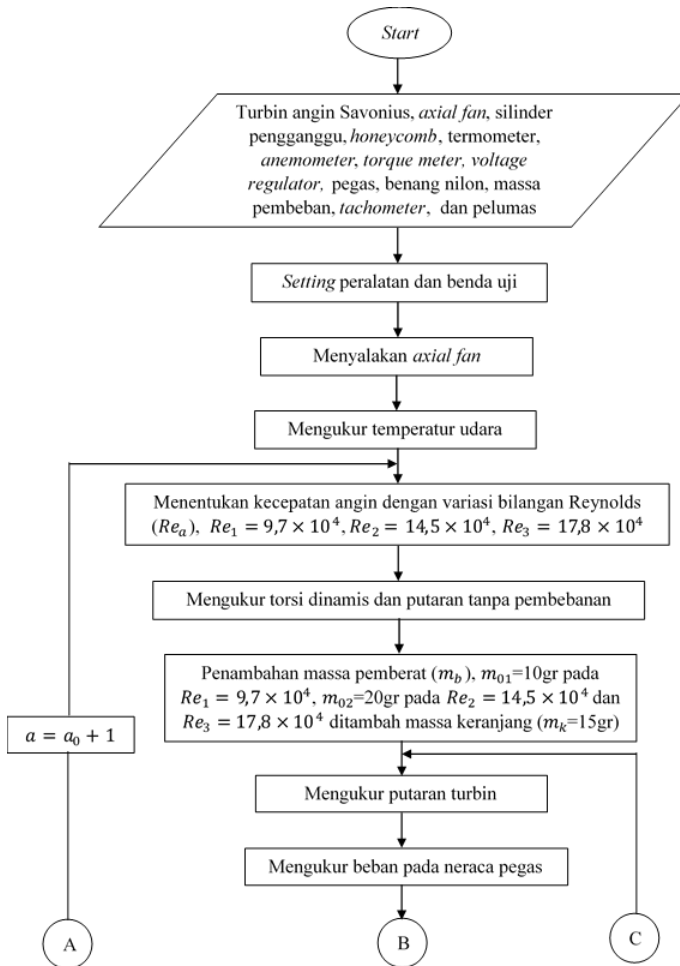
sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai yang diharapkan.

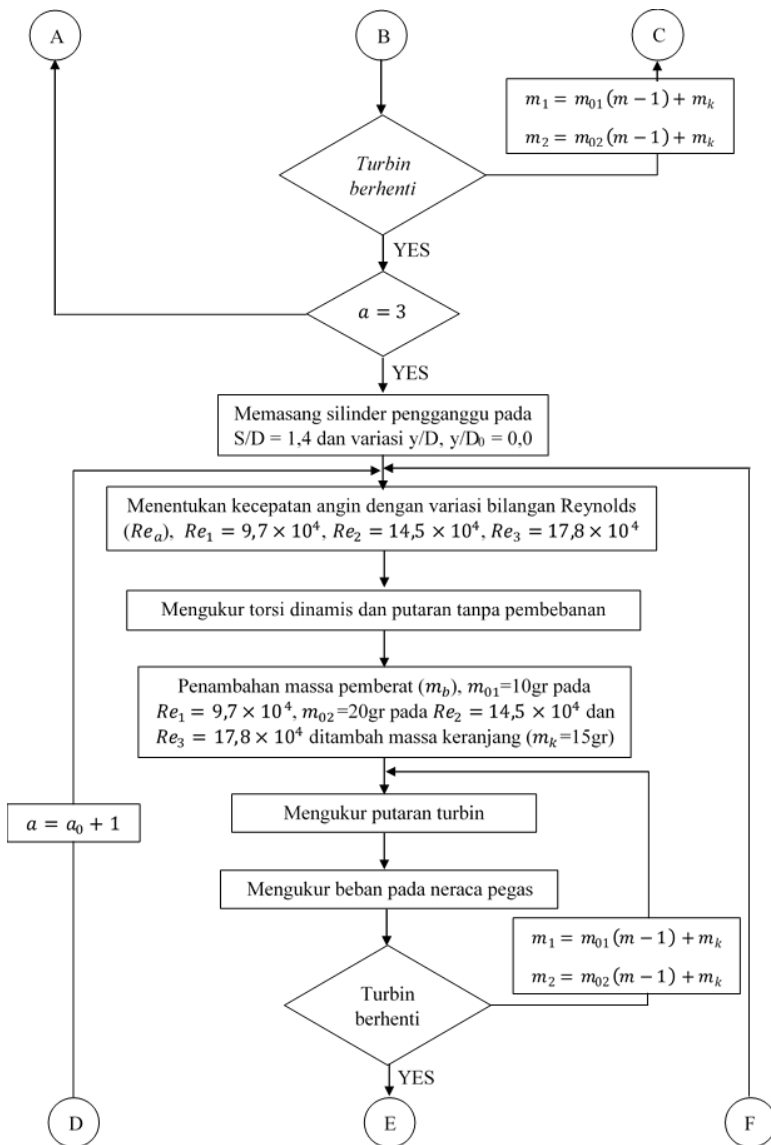
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan *anemometer* pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$.
6. Melakukan pengukuran torsi statis tanpa silinder pengganggu menggunakan *torquemeter*.
7. Mematikan *axial fan*.
8. Mengulangi langkah 3 sampai 7 dengan mengubah bilangan Reynolds = $14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$.
9. Mengulangi langkah 3 sampai 8 dengan variasi sudut tubin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (dengan kenaikan 10° tiap pengamatan).
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) sebesar 1,4 dan posisi silinder penghalang yang tegak lurus arah datangnya angin terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,5.
11. Menentukan variasi sudut tubin angin Savonius (θ) sebesar 0° .
12. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin dengan menggunakan *anemometer* pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$.
13. Melakukan pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torquemeter*.
14. Mematikan *axial fan*.
15. Mengulangi langkah 11 sampai 14 dengan mengubah bilangan Reynolds = $14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$.
16. Mengulangi langkah 11 sampai 15 dengan variasi sudut tubin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (dengan kenaikan 10° tiap pengamatan).
17. Mengolah data yang diperoleh (torsi statis) dan melakukan *plotting* grafik torsi statis (T_s) dan torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) sebagai fungsi sudut (θ).

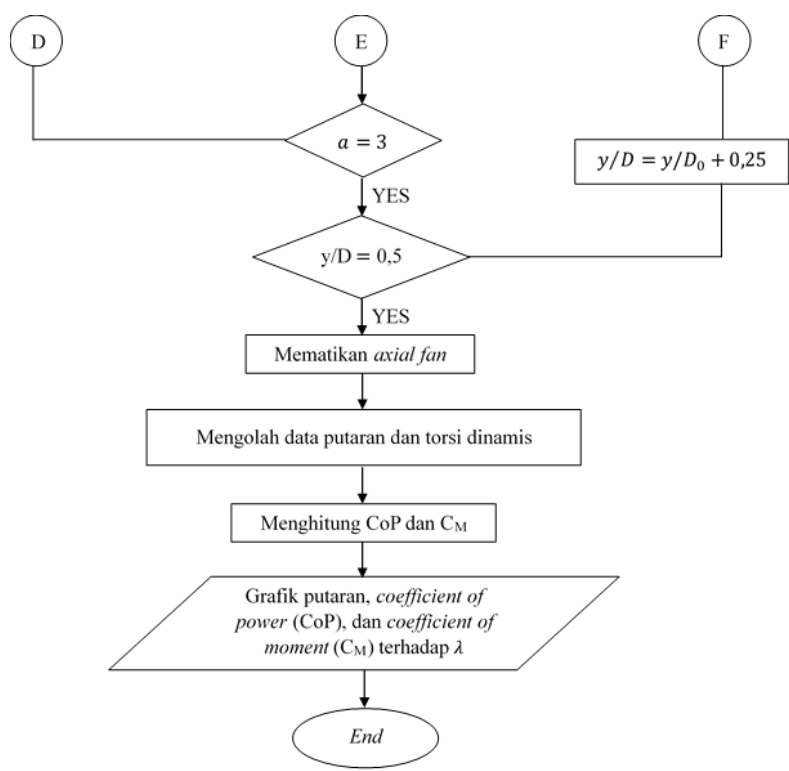
3.3.2 Flowchart Penelitian

Urutan langkah pengambilan data pada penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir (*flowchart*) sebagai berikut:

3.3.2.1 Flowchart Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

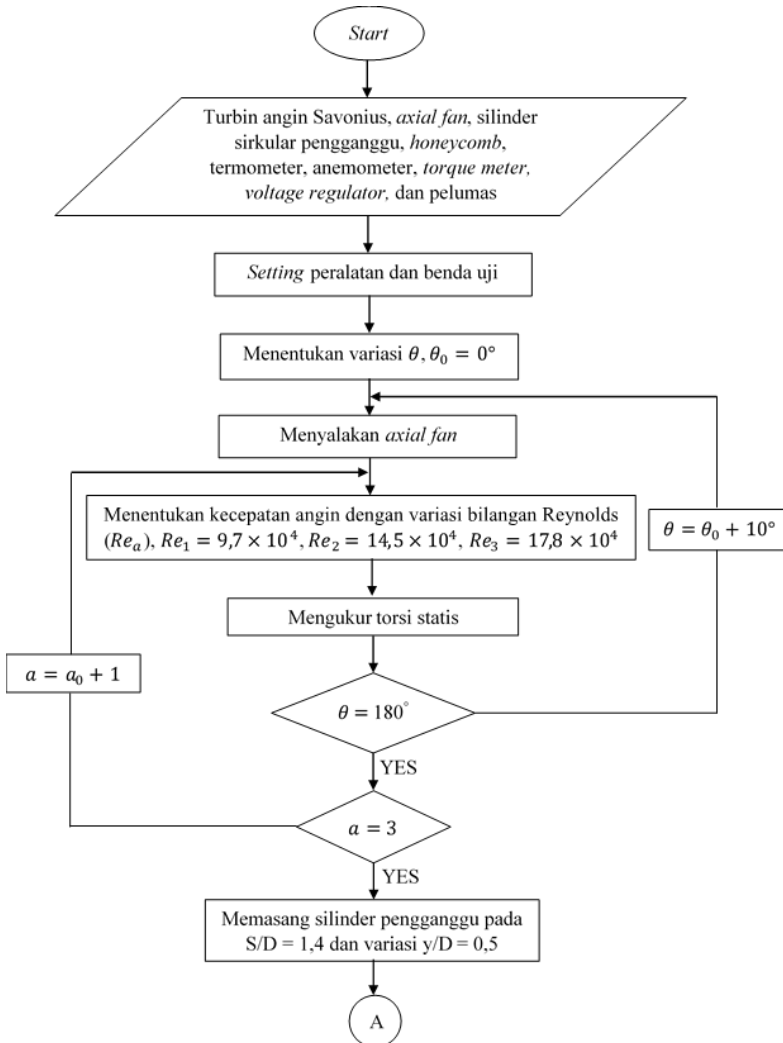


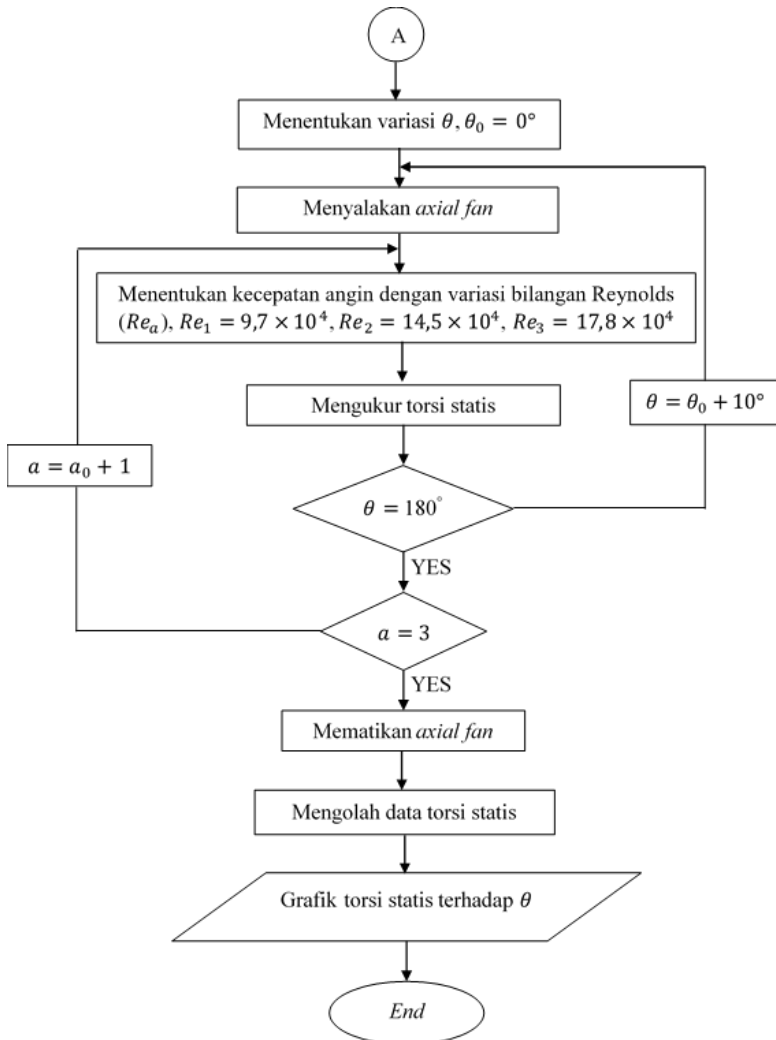




Gambar 3.19 *Flowchart* Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

3.3.2.2 Flowchart Menentukan Torsi Statis





Gambar 3.20 *Flowchart* Menentukan Torsi Statis

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian Tugas Akhir yang dilakukan, didapatkan data bahwa terjadi pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius terhadap performa turbin angin. Dimana data tersebut terdiri dari nilai putaran, torsi statis, *coefficient of power* dan *coefficient of moment* yang dihasilkan dari turbin angin menggunakan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu di depannya. Data tersebut didapatkan berdasarkan variasi *Reynolds Number* yang melewati turbin angin serta variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D).

4.1 Data Penelitian dan Contoh Perhitungan

Pengambilan data menggunakan udara sebagai fluida kerja dimana pada penelitian ini beberapa hal diasumsikan seperti aliran *steady* dan *incompressible* yang memiliki nilai sebagai berikut:

1. Tekanan *absolute* udara dalam keadaan standar (P_1) = $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_1) = 288,2 K.
3. Temperatur udara ruangan kerja (T_2) = 28,2 °C = 301,2 K.
4. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_1) = 1,225 kg/m³.

Data diatas merupakan data standart yang digunakan untuk contoh perhitungan dan perhitungan pada penelitian yang dilakukan. Adapun perhitungan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

- **Massa Jenis Udara (ρ)**

Perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai masa jenis udara pada saat penelitian dapat digunakan persamaan *Boyle*

– *Gay Lusacc* mengenai pemuaian gas. Dimana persamaannya adalah sebagai berikut:

$$P V = m R T \quad (4.1)$$

dengan membagi kedua ruas dengan m , maka persamaan 4.1 menjadi:

$$P \frac{V}{m} = R T \text{ atau } \frac{P}{\rho} = R T \quad (4.2)$$

maka,

$$\rho = \frac{P}{R T} \quad (4.3)$$

dimana:

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

P = Tekanan udara pada saat penelitian dilakukan = 1 atm = 101325 Pa

R = Konstanta spesifik gas = 287,058 J/kg K

T = Temperatur pada saat penelitian dilakukan = 28,2 °C = 301,2 K

dengan mensubtitusikan nilai P , R dan T , maka didapatkan:

$$\rho = \frac{101325 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} 301,2 \text{ K}} = 1,1772 \text{ kg/m}^3$$

- **Viskositas *Absolute* Udara (μ)**

Adapun perhitungan viskositas *absolute* udara menggunakan persamaan dari **Sutherland** sebagai berikut:

$$\mu_2 = \frac{b \times (T_2)^{0,5}}{1 + \frac{s}{T_2}} \quad (4.4)$$

dimana :

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{Kg}{m.s.K^{0,5}}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

Temperatur pengujian yang dilakukan adalah $28,2^\circ\text{C} = 301,2 \text{ K}$, sehingga perhitungannya menjadi :

$$\mu_2 = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0,5}} \times (301,2K)^{0,5}}{1 + \frac{110,4 \text{ K}}{301,2 \text{ K}}} = 1,8528 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

- **Kecepatan *Freestream* Udara (U_∞)**

Dengan nilai massa jenis dan viskositas *absolute* udara yang telah didapatkan dalam perhitungan sebelumnya, nilai *Reynolds Number* = $17,8 \times 10^4$ dan nilai panjang karakteristik turbin Savonius sebesar 0,3034 m maka dapat diketahui nilai kecepatan *freestream* udara dengan perhitungan seperti dibawah ini :

$$U_\infty = \frac{Re \times \mu}{\rho_2 \times L} \quad (4.5)$$

dimana:

Re = *Reynolds number*

μ = Viskositas *absolute* udara (kg/ms)

ρ = Massa jenis udara (kg/m³)

U_∞ = Kecepatan *freestream* udara (m/s)

L = Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini adalah diameter turbin
= 303,4 mm = 0,3034 m

$$U_\infty = \frac{17,8 \times 10^5 \times 1,8528 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1,1772 \frac{kg}{m^3} \times 0,3034 \text{ m}} = 9,2 \text{ m/s}$$

Sehingga didapatkan nilai kecepatan aliran udara pada berbagai *Reynolds number* yang diinginkan, seperti pada tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Kecepatan Aliran Udara pada Tiga Variasi *Reynolds number*

<i>Reynolds number</i> (Re)	Kecepatan Aliran Udara (U)
9,7 x 10 ⁴	5,01 m/s
14,5 x 10 ⁴	7,5 m/s
17,8 x 10 ⁴	9,2 m/s

4.2 Contoh Perhitungan

Pada sub bab 4.2 ini akan dibahas mengenai contoh perhitungan dari *Tip Speed Ratio* (TSR), torsi dinamis (Td), *Coefficient of power* (CoP), dan *Coefficient of Moment* (Cm). Data yang digunakan untuk contoh perhitungan ini adalah pada kecepatan aliran udara sebesar U = 9,2 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Berikut merupakan penjelasannya.

4.2.1 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR)

Persamaan untuk mendapatkan TSR pada bilangan *Reynolds* = 17,8 x 10⁴ adalah sebagai berikut:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega \cdot R}{U}$$

dimana:

λ = *Tip Speed Ratio* (TSR)

ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s) = $\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$

R = Jari-jari sudu turbin angin Savonius (m) = $\frac{L}{2}$

U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

Contoh perhitungan diambil dari data kedua tanpa silinder pengganggu dengan U = 9,2 m/s. Berikut ini contoh perhitungannya:

- n = 626,9 rpm
- $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 626,9}{60} = 65,62 \text{ rad/s}$

- $R = \frac{L}{2} = \frac{303,4 \text{ mm}}{2} = 151,7 \text{ mm} = 0,1517 \text{ m}$

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U} = \frac{65,62 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,1517 \text{ m}}{9,2 \text{ m/s}} = 1,08$$

4.2.2 Perhitungan Besar Nilai Torsi Dinamis (Td)

Persamaan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada bilangan *Reynolds* = $17,8 \times 10^4$ adalah sebagai berikut:

$$Td = \{(m - s)g\} \times r$$

dimana:

- m = Massa beban, dihitung dari jumlah beban yang ditambahkan (gram)
- s = Massa pegas yang dilihat pada skala pegas (gram)
- g = Gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- r = Jari-jari poros turbin (m)

Contoh perhitungan diambil dari data kedua tanpa silinder pengganggu dengan $U = 9,2 \text{ m/s}$. Berikut ini contoh perhitungannya:

- m = 15 gr = 0,015 kg
- s = 50 gr = 0,05 kg
- g = $9,81 \text{ m/s}^2$
- r = $\frac{\frac{19}{2}}{1000} = 0,0095 \text{ m}$

Sehingga didapatkan nilai torsi dinamis:

$$\begin{aligned} Td &= \{(m - s)g\} \times r \\ &= \{(0,015 \text{ kg} - 0,05 \text{ kg})9,81 \text{ m/s}^2\} \times 0,0095 \text{ m} \\ &= 0,00326 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4.2.3 Perhitungan Nilai *Coefficient of power* (CoP)

Persamaan untuk mendapatkan nilai *Coefficient of power* (CoP) pada bilangan *Reynolds* = $17,8 \times 10^4$ adalah sebagai berikut:

$$CoP = \frac{Td \times \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3}$$

dimana:

CoP = *Coefficient of power*

ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

A = Luas penampang turbin angin Savonius (m^2)

= L x H

= $(303,4/1000) \text{ m} \times (294,4/1000) \text{ m}$

= $0,0893 \text{ m}^2$

Contoh perhitungan diambil dari data pertama tanpa penghalang dengan U = 9,2 m/s. Berikut ini contoh perhitungannya:

$$CoP = \frac{0,00326 \text{ Nm} \times 65,62 \text{ rad/s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0893 \text{ m}^2 \cdot (9,2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3} = 0,005228$$

4.2.4 Perhitungan Nilai *Coefficient of Moment* (Cm)

Persamaan untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) pada bilangan *Reynolds* = $17,8 \times 10^4$ adalah sebagai berikut:

$$Cm = \frac{Td}{\frac{1}{2} \rho A U^2 \frac{L}{2}}$$

dimana:

Cm = *Coefficient of Moment*

Contoh perhitungan diambil dari data kedua tanpa penghalang dengan $U = 9,2 \text{ m/s}$. Berikut ini contoh perhitungannya:

$$\begin{aligned}
 C_m &= \frac{Td}{\frac{1}{2}\rho AU^2 \frac{L}{2}} \\
 &= \frac{0,00326 \text{ Nm}}{\frac{1}{2} \cdot 1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0893 \text{ m}^2 \cdot (9,2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot \frac{0,3034 \text{ m}}{2}} \\
 &= 0,004832
 \end{aligned}$$

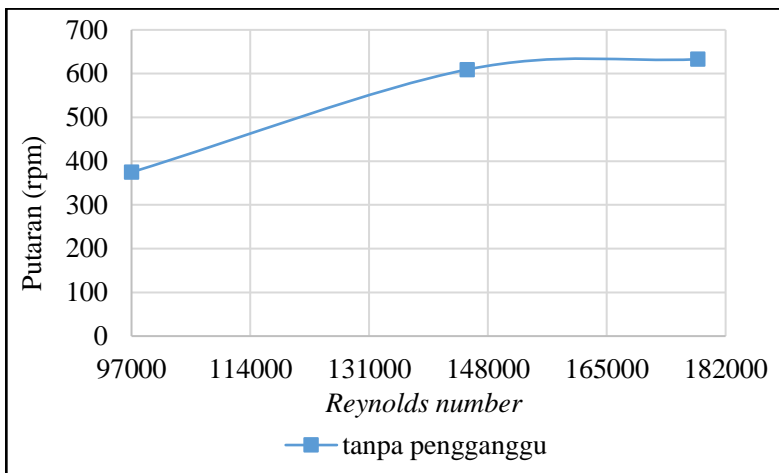
4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu

Pada sub bab ini, analisa performa turbin dilakukan saat turbin dalam kondisi bebas, yaitu tanpa silinder pengganggu di depan sisi *returning blade*. Adapun variasi yang akan dianalisa adalah variasi putaran turbin sebagai fungsi *Reynolds number*, *coefficient of power* sebagai fungsi *tip speed ratio*, *coefficient of moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*, dan torsi statis dari turbin angin tersebut. Berikut merupakan penjelasannya.

4.3.1 Analisa Nilai Putaran sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai nilai putaran turbin angin Savonius sebagai fungsi *Reynolds number*. Nilai putaran sebagai fungsi *Reynolds number* diukur dengan mengukur nilai putaran menggunakan 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar 5,01 m/s, pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang

sebesar 7,5 m/s, dan pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar 9,2 m/s. Pengukuran ini dilakukan pada saat turbin dalam keadaan berputar bebas dengan diberikan pembebanan tetapi tanpa menempatkan penghalang didepannya. Pengujian ini dilakukan, menggunakan alat ukur *tachometer digital* dalam pembacaan nilai putaran pada turbin angin disaat masing-masing nilai *Reynolds number*. Adapun data yang didapatkan dari pengukuran terdapat pada gambar 4.1 sebagai berikut.



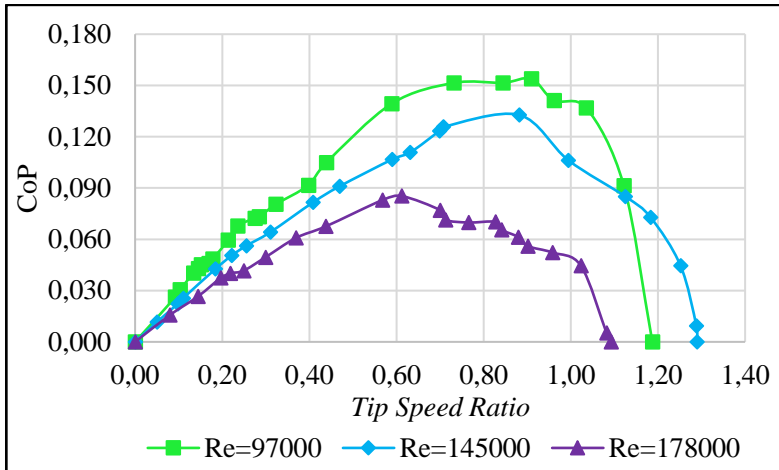
Gambar 4.1 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Reynolds number*

Pada gambar 4.1 menunjukkan grafik nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi *Reynolds number* tanpa pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik cenderung meningkat seiring dengan semakin besarnya *Reynolds number*. Nilai putaran pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya *Reynolds number*. Putaran maksimum tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$

yaitu sebesar 632,86 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 374,57 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 609,2 rpm. Gambar 4.1 memperlihatkan bahwa seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds, maka putaran dari turbin angin Savonius juga semakin tinggi, ini dikarenakan kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius sangat berpengaruh terhadap putaran yang dihasilkan oleh turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan oleh turbin juga semakin tinggi.

4.3.2 Analisa Nilai *Coefficient of power* sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai nilai *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio*. Pengukuran ini dilakukan pada saat turbin dalam keadaan berputar bebas dengan diberikan pembebanan tetapi tanpa menempatkan penghalang didepannya. Pada pengujian ini, daya *output* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius berasal dari perkalian torsi dinamis dengan putaran turbin yang didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Adapun, saat daya *output* sudah didapatkan maka akan dibagi dengan nilai daya *input* dari turbin angin sehingga didapat nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius di setiap *tip speed ratio*. Pada pengujian ini digunakan 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar 5,01 m/s, pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang sebesar 7,5 m/s, dan pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar 9,2 m/s. Adapun data nilai *coefficient of power* yang didapatkan dari hasil pengujian pada variasi *Reynolds number* terdapat pada gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of power* Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio*

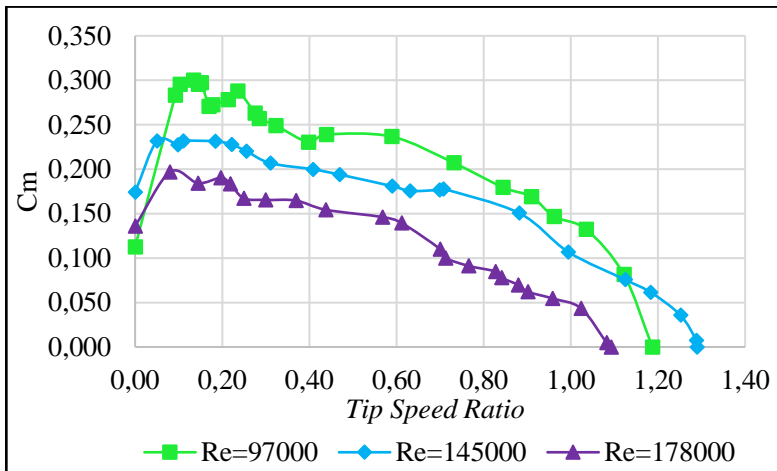
Gambar 4.2 diatas menunjukkan grafik *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai CoP maksimum tertinggi terjadi pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, dan nilai CoP maksimum terendah terjadi pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik membentuk kurva parabolik, *trendline* grafik cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* hingga batas *tip speed ratio* maksimum, kemudian turun. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, didapatkan *coefficient of power* maksimum tertinggi sebesar 0,15 yang dicapai pada *tip speed ratio* 0,91. Pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, didapatkan *coefficient of power* maksimum sebesar 0,13 yang dicapai pada *tip speed ratio* 0,88. Sedangkan pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$, didapatkan *coefficient of power* maksimum terendah sebesar 0,09 yang dicapai pada *tip speed ratio* 0,61. Dari data tersebut diketahui bahwa nilai daya meningkat saat $Re = 9,7 \times 10^4$ kemudian turun

pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan nilai daya terendah terjadi pada *Reynolds number* terbesar yaitu $Re = 17,8 \times 10^4$. Hal tersebut terjadi dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik. Karena jenis turbin angin ini merupakan jenis turbin yang cocok untuk kecepatan angin yang rendah. Selain itu, perumusan daya turbin terdapat faktor daya *input* yang memiliki fungsi perpangkatan tiga dari kecepatan aliran fluida, dimana, seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* akan meningkatkan pula kecepatan aliran fluida, maka nilai daya *input* akan menjadi lebih besar dengan faktor perpangkatan tiga yang menyebabkan kecenderungan koefisien daya akan menurun seperti grafik diatas. Hal ini dikarenakan kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius sangat berpengaruh terhadap *coefficient of power* dari turbin angin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin semakin rendah. Hal ini dikarenakan kenaikan kecepatan yang besar tidak diiringi dengan kenaikan daya yang besar pula.

4.3.3 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai nilai *coefficient of moment* yang dimiliki oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi *tip speed ratio*. Pengukuran ini dilakukan pada saat turbin dalam keadaan berputar bebas dengan diberikan pembebanan tetapi tanpa menempatkan penghalang didepannya. Pada pengujian ini, nilai dari *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius berasal dari nilai torsi dinamis dari turbin dibagi dengan tekanan dinamis aliran bebas dikalikan luas penampang turbin dan dikalikan dengan setengah diameter turbin $\left(C_m = \frac{T_d}{\frac{1}{2}\rho AU^2 R} \right)$. Nilai torsi dinamis didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Setelah mendapatkan nilai torsi dinamis, maka dilakukan perhitungan yang kemudian akan didapatkan nilai dari

coefficient of moment dari turbin angin Savonius. Pada pengujian ini digunakan 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar 5,01 m/s, pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang sebesar 7,5 m/s, dan pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar 9,2 m/s. Adapun data nilai *coefficient of moment* yang didapatkan dari hasil pengujian pada variasi *Reynolds number* terdapat pada gambar 4.3 sebagai berikut.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio*

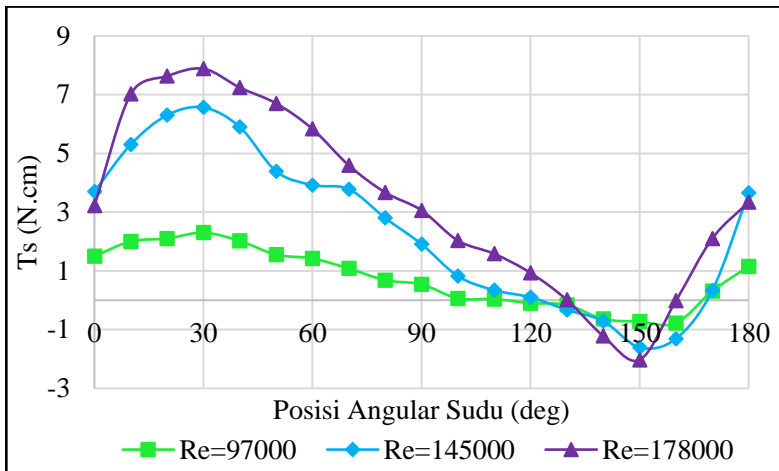
Gambar 4.3 diatas menunjukkan grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai C_m maksimum tertinggi terjadi pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, dan nilai C_m maksimum terendah terjadi pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ didapatkan *coefficient of moment* (C_m) maksimum tertinggi sebesar 0,30 yang dicapai pada *tip speed ratio* 0,13. Pada *Reynolds number* = $14,5 \times$

10^4 didapatkan *coefficient of moment* (C_m) maksimum sebesar 0,23 yang dicapai pada *tip speed ratio* 0,11. Sedangkan pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ didapatkan *coefficient of moment* (C_m) maksimum terendah sebesar 0,19 yang dicapai pada *tip speed ratio* 0,08. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa nilai *coefficient of moment* meningkat pada *tip speed ratio* awal hingga harga *tip speed ratio* optimumnya, kemudian cenderung mengalami penurunan seiring dengan semakin besarnya *tip speed ratio*. Hal tersebut terjadi dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik. Karena jenis turbin angin ini merupakan jenis turbin yang cocok untuk kecepatan angin yang rendah. Selain itu, perumusan *coefficient of moment* turbin angin Savonius terdapat faktor tekanan dinamis aliran bebas yang memiliki fungsi perpangkatan dua dari kecepatan aliran fluida, dimana, seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* akan meningkatkan pula kecepatan aliran fluida yang menyebabkan nilai dari tekanan dinamis aliran bebas akan menjadi lebih besar dengan faktor perpangkatan dua yang menyebabkan kecenderungan *coefficient of moment* akan menurun seperti pada grafik diatas. Hal ini dikarenakan kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius sangat berpengaruh terhadap *coefficient of moment* dari turbin angin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin semakin rendah.

4.3.4 Analisa Nilai Torsi Statis sebagai Fungsi Besar Posisi Angular Sudu pada Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai nilai dari torsi statis yang dimiliki oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi besar posisi angular sudu. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° terhadap bidang tegak lurus aliran udara. Uji torsi statis ini dilakukan di 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re =$

$14,5 \times 10^4$ dan kemudian $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar 5,01 m/s, pada *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang sebesar 7,5 m/s, dan pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar 9,2 m/s. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *torquemeter digital*. Uji torsi statis dilakukan pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° sampai dengan sudut 180° . Adapun data yang didapatkan dari pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.4 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu (θ) pada $S/D = 1,4$

Pada gambar 4.4 diatas menunjukkan nilai torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi posisi angular sudu tanpa pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai torsi statis maksimum tertinggi terjadi saat *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 7,88 N.cm pada posisi angular sudu $= 30^\circ$ dan nilai torsi statis maksimum terendah terjadi saat *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 2,3 N.cm pada posisi angular sudu

= 30° , serta untuk *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ memiliki nilai torsi statis maksimum sebesar 6,56 N.cm pada posisi angular sudu = 30° . Sedangkan untuk posisi angular sudu terendah terdapat pada posisi angular sudu = 150° ketika *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ dan *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ dengan nilai torsi statis minimum terendah pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ sebesar -2,03 N.cm, pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ dengan nilai torsi statis minimum tertinggi sebesar -1,61 N.cm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, nilai torsi statis terendah sebesar -0,78 N.cm terjadi saat posisi angular sudu = 160° . Dari ketiga variasi *Reynolds number* tersebut grafik memiliki posisi angular sudu tertinggi dan terendah yang hampir sama dan memiliki bentuk *trendline* yang cenderung sama. Adapun hasil posisi angular sudu saat sudut 0° dan 180° memiliki nilai yang tidak terlalu jauh bahkan hampir mendekati sama, dimana pengukuran torsi statis tidak selalu mendapatkan hasil positif melainkan pengukuran juga mendapatkan nilai negatif yang kemudian di rata-ratakan dari kesepuluh pengukuran sehingga hasil yang didapat pada grafik diatas bisa bernilai positif dan negatif. Hal ini membuktikan bahwa nilai torsi statis pada turbin dipengaruhi oleh arah datangnya aliran *fluida*. Dan kemampuan *self-starting* turbin Savonius kurang baik saat posisi sudut 120° , 130° , 140° , 150° , 160° pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, saat posisi sudut 130° , 140° , 150° , 160° pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, dan saat posisi sudut 140° , 150° , 160° pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$. Hal ini dikarenakan torsi statis pada posisi sudut tersebut tidak bernilai positif, karena turbin tidak mampu menangkap angin dari berbagai posisi.

4.4 Analisa Perbandingan Performa Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu

Pada sub bab ini, akan dijelaskan analisa perbandingan performa turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu. Adapun variasi yang akan dianalisa adalah perbandingan n/n_0 sebagai fungsi *Reynolds number*, CoP/CoP_0

sebagai fungsi *tip speed ratio*, C_m/C_{m_0} sebagai fungsi *tip speed ratio*, dan T_s/T_{s_0} sebagai fungsi posisi angular sudu. Berikut merupakan penjelasannya.

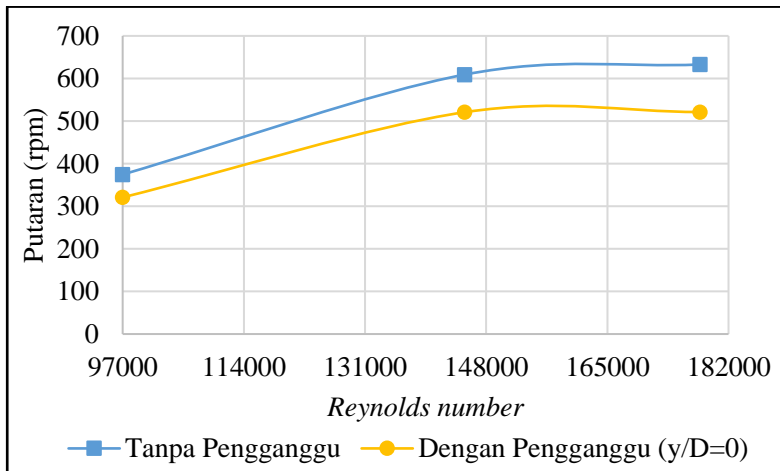
4.4.1 Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai analisa perbandingan nilai putaran antara turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *Reynolds number* pada 3 variasi posisi penempatan silinder pengganggu, yaitu pada $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ dan pada keadaan turbin angin tanpa silinder pengganggu, yang masing-masing menggunakan variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Berikut merupakan penjelasannya.

4.4.1.1 Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $y/D = 0,0$

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai perbandingan nilai putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,0$ sebagai fungsi *Reynolds number*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,4$ dengan $d/D = 0,5$ pada posisi $y/D = 0,0$ yang akan dibandingkan dengan pengujian tanpa menggunakan silinder pengganggu. Nilai putaran sebagai fungsi *Reynolds number* diukur dengan mengukur nilai putaran menggunakan 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar $5,01$ m/s, pada *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang sebesar $7,5$ m/s, dan pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar $9,2$ m/s. Pengujian

ini dilakukan menggunakan alat ukur *tachometer digital* dalam pembacaan nilai putaran pada turbin angin disaat masing-masing *Reynolds number*. Adapun data yang didapatkan dari pengukuran nilai putaran pada 3 variasi *Reynolds number* terdapat pada gambar 4.5 sebagai berikut.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Reynolds number* pada $y/D = 0,0$

Pada gambar 4.5 menunjukkan grafik perbandingan nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *Reynolds number*, dimana penempatan silinder pengganggu yaitu pada jarak $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,0$ di depan *returning blade*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik tanpa pengganggu lebih tinggi dibandingkan dengan *trendline* dari grafik dengan pengganggu. Pada turbin angin Savonius tanpa pemberian silinder pengganggu, *trendline* grafik cenderung meningkat seiring dengan semakin besarnya nilai *Reynolds number*. Nilai putaran pada turbin angin Savonius tanpa

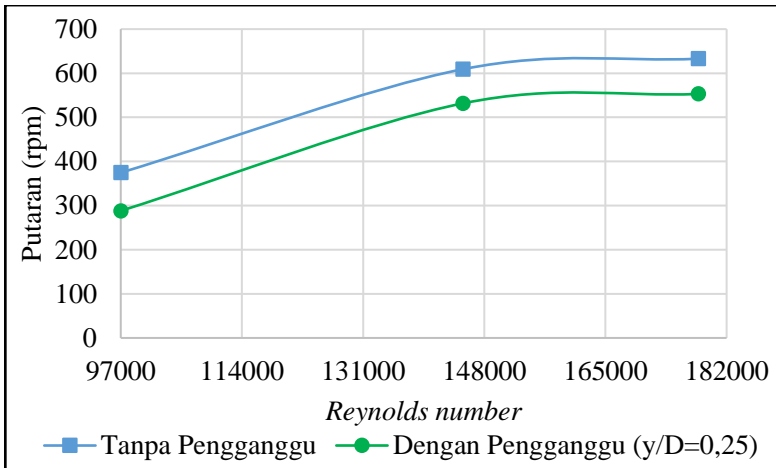
silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya *Reynolds number*. Putaran maksimum tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 632,86 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 374,57 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 609,2 rpm. Pada turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$ dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik cenderung meningkat hingga *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$. Pada saat $y/D = 0,0$, putaran maksimum tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 521,27 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 320,85 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran maksimum yang dihasilkan turbin adalah sebesar 520,89 rpm.

Hal tersebut terjadi karena semakin besar *Reynolds number*, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius juga semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar *Reynolds number*, maka semakin besar pula putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.5 diatas, turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,0$ menghasilkan putaran yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa pemberian silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena penempatan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,0$ dapat menghalangi aliran angin yang mengarah ke *advancing blade*, sehingga aliran angin yang mengenai *advancing blade* berkurang, yang menyebabkan gaya *drag* pada *advancing blade* juga berkurang, sedangkan *shear layer* pada silinder pengganggu kurang efektif memberi gangguan *boundary layer* pada *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Dengan demikian, selisih gaya *drag* yang diterima oleh kedua *blade* turbin angin Savonius yaitu sisi

returning dan *advancing* juga akan mengalami penurunan yang mengakibatkan berkurangnya putaran turbin angin Savonius. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,0$ tidak efektif untuk meningkatkan putaran turbin angin Savonius.

4.4.1.2 Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $y/D = 0,25$

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai perbandingan nilai putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,25$ sebagai fungsi *Reynolds number*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,4$ dengan $d/D = 0,5$ pada posisi $y/D = 0,25$ yang akan dibandingkan dengan pengujian tanpa menggunakan silinder pengganggu. Nilai putaran sebagai fungsi *Reynolds number* diukur dengan mengukur nilai putaran menggunakan 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar 5,01 m/s, pada *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang sebesar 7,5 m/s, dan pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar 9,2 m/s. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat ukur *tachometer digital* dalam pembacaan nilai putaran pada turbin angin disaat masing-masing *Reynolds number*. Adapun data yang didapatkan dari pengukuran nilai putaran pada 3 variasi *Reynolds number* terdapat pada gambar 4.6 sebagai berikut.



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Reynolds number* pada $y/D = 0,25$

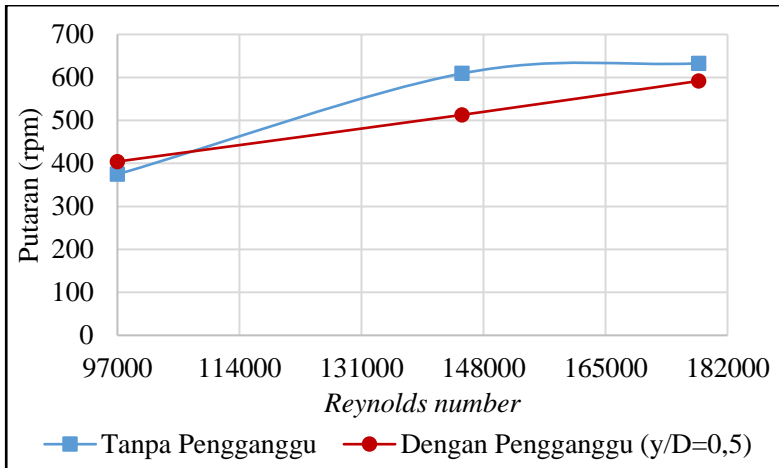
Pada gambar 4.6 menunjukkan grafik perbandingan nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *Reynolds number*, dimana penempatan silinder pengganggu yaitu pada jarak $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,25$ di depan *returning blade*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik tanpa pengganggu lebih tinggi dibandingkan dengan *trendline* dari grafik dengan pengganggu. Pada turbin angin Savonius tanpa pemberian silinder pengganggu, *trendline* grafik cenderung meningkat seiring dengan semakin besarnya nilai *Reynolds number*. Nilai putaran pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya *Reynolds number*. Putaran maksimum tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 632,86 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 374,57 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran

maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 609,2 rpm. Pada turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $y/D = 0,25$ dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik cenderung meningkat seiring dengan semakin besarnya *Reynolds number*. Nilai putaran pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya *Reynolds number*. Pada saat $y/D = 0,25$, putaran maksimum tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 553,01 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 288,11 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran maksimum yang dihasilkan turbin adalah sebesar 531,7 rpm.

Hal tersebut terjadi karena semakin besar *Reynolds number*, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius juga semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar *Reynolds number*, maka semakin besar pula putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.6 diatas, turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,25$ menghasilkan putaran yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa pemberian silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena penempatan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,25$ dapat menghalangi aliran angin yang mengarah ke *advancing blade*, sehingga aliran angin yang mengenai *advancing blade* berkurang yang menyebabkan gaya *drag* pada *advancing blade* juga berkurang. Dengan demikian, selisih gaya *drag* yang diterima oleh kedua *blade* turbin angin Savonius yaitu sisi *returning* dan *advancing* juga akan mengalami penurunan yang mengakibatkan berkurangnya putaran turbin angin Savonius. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,25$ tidak efektif untuk meningkatkan putaran turbin angin Savonius.

4.4.1.3 Analisa Perbandingan Nilai Putaran antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $y/D = 0,5$

Sub bab ini akan menjelaskan mengenai perbandingan nilai putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ sebagai fungsi *Reynolds number*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,4$ dengan $d/D = 0,5$ pada posisi $y/D = 0,5$ yang akan dibandingkan dengan pengujian tanpa menggunakan silinder pengganggu. Nilai putaran sebagai fungsi *Reynolds number* diukur dengan mengukur nilai putaran menggunakan 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ digunakan kecepatan rendah sebesar 5,01 m/s, pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$ digunakan kecepatan sedang sebesar 7,5 m/s, dan pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ digunakan kecepatan tinggi sebesar 9,2 m/s. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat ukur *tachometer digital* dalam pembacaan nilai putaran pada turbin angin disaat masing-masing *Reynolds number*. Adapun data yang didapatkan dari pengukuran nilai putaran pada 3 variasi *Reynolds number* terdapat pada gambar 4.7 sebagai berikut.



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Reynolds number* pada $y/D = 0,5$

Pada gambar 4.7 menunjukkan grafik perbandingan nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *Reynolds number*, dimana penempatan silinder pengganggu yaitu pada jarak $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,5$ di depan *returning blade*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik tanpa pengganggu lebih tinggi dibandingkan dengan *trendline* dari grafik dengan pengganggu, tetapi pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ nilai putaran pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu lebih tinggi yaitu sebesar 404,35 rpm dibandingkan tanpa silinder pengganggu yang menghasilkan nilai putaran sebesar 374,57 rpm. Pada turbin angin Savonius tanpa pemberian silinder pengganggu, *trendline* grafik cenderung meningkat seiring dengan semakin besarnya nilai *Reynolds number*. Nilai putaran pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya *Reynolds number*. Putaran maksimum

tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 632,86 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 374,57 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 609,2 rpm. Pada turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik cenderung meningkat seiring dengan semakin besarnya *Reynolds number*. Nilai putaran pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya *Reynolds number*. Pada saat $y/D = 0,5$, putaran maksimum tertinggi dihasilkan oleh *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 591,91 rpm dan putaran maksimum terendah dihasilkan oleh *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 404,35 rpm. Sedangkan pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, nilai putaran maksimum yang dihasilkan turbin adalah sebesar 512,91 rpm.

Hal tersebut terjadi karena semakin besar *Reynolds number*, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius juga semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar *Reynolds number*, maka semakin besar pula putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.7 diatas, turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,5$ menghasilkan putaran yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa pemberian silinder pengganggu, kecuali pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$. Hal ini terjadi karena penempatan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ dapat menghalangi aliran angin yang mengarah ke *advancing blade*, sehingga aliran angin yang mengenai *advancing blade* berkurang yang menyebabkan gaya *drag* pada *advancing blade* juga berkurang. Dengan demikian, selisih gaya *drag* yang diterima oleh kedua *blade* turbin angin Savonius yaitu sisi *returning* dan *advancing* juga akan mengalami penurunan yang mengakibatkan

berkurangnya putaran turbin angin Savonius. Dari gambar 4.7 diatas dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ dan pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$, menghasilkan nilai putaran yang lebih tinggi dari turbin tanpa silinder pengganggu, karena dapat lebih banyak mengarahkan aliran angin menuju *advancing blade*, menyebabkan gaya *drag* pada *advancing blade* akan meningkat, sehingga selisih gaya *drag* yang diterima oleh kedua *blade* turbin angin Savonius meningkat yang menyebabkan nilai putaran juga akan meningkat. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,4$ dan $y/D = 0,5$ efektif untuk meningkatkan putaran turbin angin Savonius saat *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$ dengan kenaikan sebesar 1,08 kali dari putaran turbin tanpa silinder pengganggu.

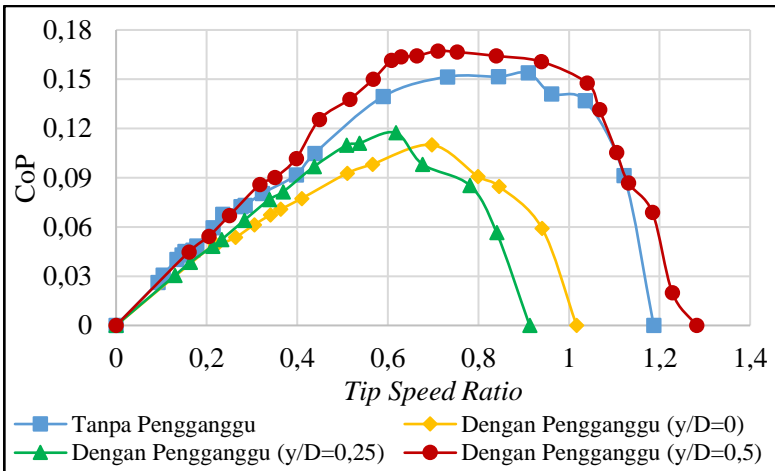
4.4.2 Analisa Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai analisa *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* pada 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$, yang masing-masing menggunakan 3 posisi y/D , yaitu pada $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ dan pada keadaan turbin tanpa silinder pengganggu. Berikut merupakan penjelasannya.

4.4.2.1 Analisa Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang

akan dilakukan adalah analisa *coefficient of power* pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan analisa *coefficient of power* pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$, $y/D = 0,25$ dan $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$. Adapun nilai dari *coefficient of power* ini didapat dari daya output yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius yang berasal dari perkalian torsi dinamis dengan putaran turbin yang didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Saat daya output sudah didapatkan maka akan dibagi dengan nilai daya input dari turbin angin sehingga didapat nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius di setiap *tip speed ratio*. Adapun grafik perbandingan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut ini.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Gambar 4.8 menunjukkan grafik nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik membentuk kurva parabolik, *trendline* grafik cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* hingga batas *tip speed ratio* maksimum, kemudian turun. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ memiliki nilai *coefficient of power* maksimum tertinggi. Sedangkan nilai *coefficient of power* maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$. Pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 0,15 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,91. Sedangkan turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum terendah sebesar 0,11 saat *tip speed ratio* 0,69. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,25$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 0,12 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,62. Sedangkan nilai *coefficient* maksimum tertinggi diperoleh saat turbin dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,17 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,71. Berdasarkan analisa perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada posisi $y/D = 0,5$ efektif untuk meningkatkan nilai *coefficient of power* (CoP) dengan kenaikan sebesar 1,09 kali dari *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

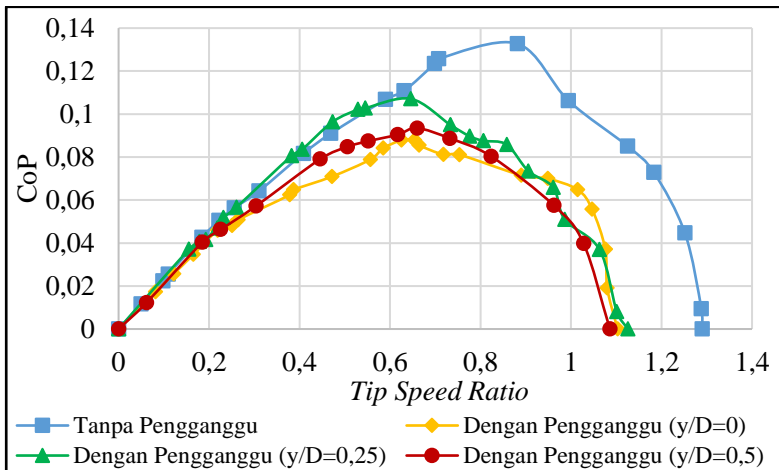
Hal ini dikarenakan pemberian silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) = 0,5 diduga dapat mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen sehingga dapat menunda titik separasi dan menyebabkan daerah *wake* akan semakin sempit. Dengan

semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan, maka akan semakin besar perbedaan gaya *drag* antar kedua sudu turbin sehingga menghasilkan nilai *coefficient of power* yang besar. Selain itu, pada posisi $y/D = 0,5$ diduga dapat mengurangi *pressure drop* pada *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat yang akan diikuti dengan meningkatnya nilai *coefficient of power* dari turbin. Pada posisi $y/D = 0,0$ nilai *coefficient of power* lebih rendah dibanding *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, hal ini karena pada posisi $y/D = 0,0$ sejajar dengan sumbu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade*, oleh sebab itu pada posisi ini tidak efektif menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat. Hal ini juga diikuti dengan tidak meningkatnya nilai torsi yang menyebabkan nilai *coefficient of power* tidak meningkat pula. Sedangkan pada posisi $y/D = 0,25$, silinder pengganggu tidak sepenuhnya mengganggu *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang, yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat dan nilai *coefficient of power* tidak meningkat.

4.4.2.2 Analisa Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa *coefficient of power* pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan analisa *coefficient of power* pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$, $y/D = 0,25$ dan $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$. Adapun nilai dari *coefficient of power* ini didapat dari daya output yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius yang berasal dari

perkalian torsi dinamis dengan putaran turbin yang didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Saat daya *output* sudah didapatkan maka akan dibagi dengan nilai daya *input* dari turbin angin sehingga didapat nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius di setiap *tip speed ratio*. Adapun grafik perbandingan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* dapat dilihat pada gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 14,5 \times 10^4$

Gambar 4.9 menunjukkan grafik nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik membentuk kurva parabolik, *trendline* grafik cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* hingga batas *tip speed ratio* maksimum, kemudian turun. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, turbin angin

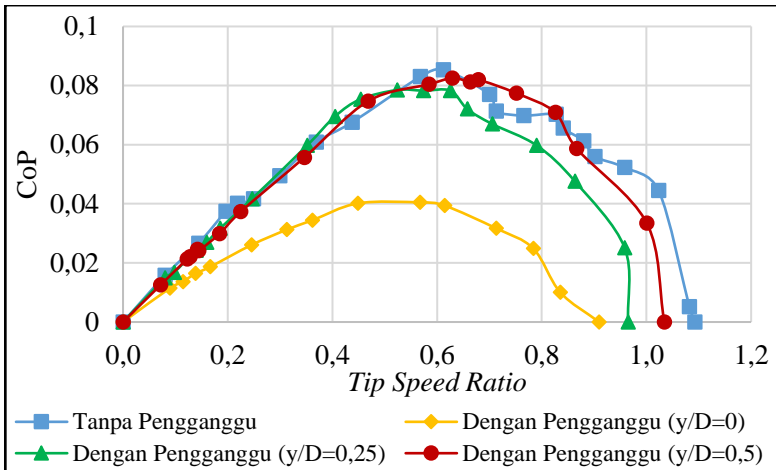
Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *coefficient of power* maksimum tertinggi. Sedangkan nilai *coefficient of power* maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$. Pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum tertinggi sebesar 0,13 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,88. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum terendah sebesar 0,09 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,65. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,25$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 0,11 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,65. Sedangkan peletakan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 0,09 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,66.

Berdasarkan analisa perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, secara umum penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk semua posisi y/D tidak efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of power* (CoP) dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Hal tersebut terjadi dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik. Selain itu, kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius berpengganggu sangat berpengaruh terhadap *coefficient of power* dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin semakin rendah. Hal ini dikarenakan kenaikan kecepatan yang besar tidak diiringi dengan kenaikan daya yang besar pula. Pada posisi $y/D = 0,0$ nilai *coefficient of power* lebih rendah dibanding *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, hal ini karena pada posisi $y/D = 0,0$ sejajar dengan sumbu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade*, oleh sebab itu pada posisi ini tidak efektif menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak

meningkat. Hal ini juga diikuti dengan tidak meningkatnya nilai torsi yang menyebabkan nilai *coefficient of power* tidak meningkat pula. Sedangkan pada posisi $y/D = 0,25$, silinder pengganggu tidak sepenuhnya mengganggu *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang, yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat dan nilai *coefficient of power* tidak meningkat.

4.4.2.3 Analisa Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 17,8 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa *coefficient of power* pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan analisa *coefficient of power* pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$, $y/D = 0,25$ dan $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$. Adapun nilai dari *coefficient of power* ini didapat dari daya *output* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius yang berasal dari perkalian torsi dinamis dengan putaran turbin yang didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Saat daya *output* sudah didapatkan maka akan dibagi dengan nilai daya *input* dari turbin angin sehingga didapat nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius di setiap *tip speed ratio*. Adapun grafik perbandingan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* dapat dilihat pada gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 17,8 \times 10^4$

Gambar 4.10 menunjukkan grafik nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio*. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik membentuk kurva parabolik, *trendline* grafik cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* hingga batas *tip speed ratio* maksimum, kemudian turun. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa turbin tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *coefficient of power* maksimum tertinggi. Sedangkan nilai *coefficient of power* maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$. Pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum tertinggi sebesar 0,09 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,61. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum terendah sebesar 0,04 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,57. Turbin dengan

silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,25$ menghasilkan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 0,08 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,52. Sedangkan nilai *coefficient of power* maksimum yang diperoleh saat turbin dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,08 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,63.

Berdasarkan analisa perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$, secara umum penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk semua posisi y/D tidak efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of power* (CoP) dibandingkan turbin tanpa silinder pengganggu. Hal tersebut terjadi dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik. Selain itu, kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius berpengganggu sangat berpengaruh terhadap *coefficient of power* dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin semakin rendah. Hal ini dikarenakan kenaikan kecepatan yang besar tidak diiringi dengan kenaikan daya yang besar pula. Pada posisi $y/D = 0,0$ nilai *coefficient of power* lebih rendah dibanding *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, hal ini karena pada posisi $y/D = 0,0$ sejajar dengan sumbu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade*, oleh sebab itu pada posisi ini tidak efektif menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat. Hal ini juga diikuti dengan tidak meningkatnya nilai torsi yang menyebabkan nilai *coefficient of power* tidak meningkat pula. Sedangkan pada posisi $y/D = 0,25$, silinder pengganggu tidak sepenuhnya mengganggu *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang, yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat dan nilai *coefficient of power* tidak meningkat.

4.4.3 Analisa Perbandingan *Coefficient of Moment* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu

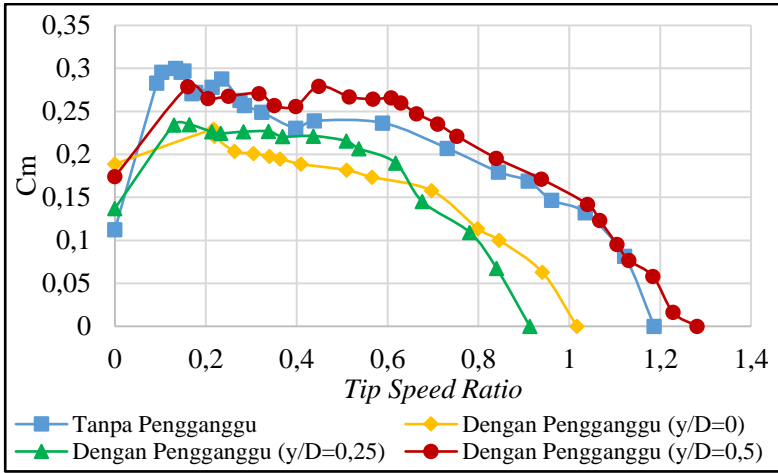
Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai analisa *coefficient of moment* antara turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* pada 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$, yang masing-masing menggunakan 3 posisi y/D , yaitu pada $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ dan pada keadaan turbin tanpa pengganggu. Berikut merupakan penjelasannya.

4.4.3.1 Analisa Perbandingan *Coefficient of Moment* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa *coefficient of moment* pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, analisa *coefficient of moment* pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$, $y/D = 0,25$ dan $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$. Adapun nilai dari *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius ini didapat dari nilai torsi dinamis dari turbin dibagi dengan tekanan dinamis aliran bebas dikalikan luas penampang turbin dan dikalikan dengan setengah diameter turbin $\left(C_m = \right.$

$\left. \frac{Td}{\frac{1}{2}\rho AU^2 R} \right)$. Nilai torsi dinamis didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Setelah mendapatkan nilai torsi dinamis, maka dilakukan perhitungan yang kemudian akan didapatkan nilai dari *coefficient of moment* dari turbin angin

Savonius. Adapun grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* dapat dilihat pada gambar 4.11 berikut ini.



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Gambar 4.11 menunjukkan grafik nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio* pada $Re = 9,7 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik adalah *linear* yang mengalami kenaikan pada awal *tip speed ratio* hingga batas optimumnya kemudian cenderung menurun. Berdasarkan grafik diatas, secara umum dapat dilihat bahwa turbin tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *coefficient of moment* maksimum tertinggi, tetapi pada *tip speed ratio* tertentu yaitu *tip speed ratio* = 0,45 turbin angin Savonius dengan pengganggu pada $y/D = 0,5$ memiliki nilai *coefficient of moment* lebih tinggi yaitu sebesar 0,28 dibandingkan dengan *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa pengganggu yaitu sebesar

0,24 yang juga dicapai pada *tip speed ratio* 0,45. Sedangkan nilai *coefficient of moment* maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$. Pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum tertinggi sebesar 0,30 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,13. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$ menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum terendah sebesar 0,22 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,21. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,25$ menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum sebesar 0,23 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,16. Sedangkan nilai *coefficient of moment* maksimum yang diperoleh saat turbin dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,28 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,45.

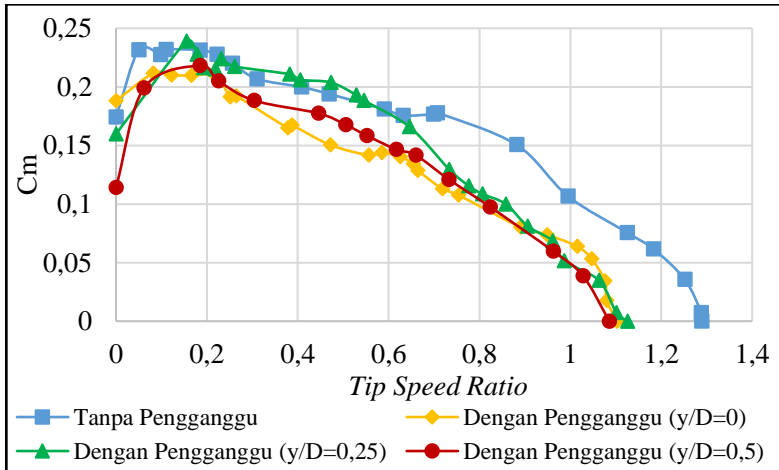
Berdasarkan analisa perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$, secara umum penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,0$ dan $0,25$ tidak efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of moment* (C_m) dibandingkan turbin tanpa pengganggu, tetapi pada kondisi tertentu yaitu saat *tip speed ratio* 0,45, penempatan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ efektif untuk meningkatkan nilai *coefficient of moment* turbin angin dengan kenaikan sebesar 1,17 kali dari *coefficient of moment* turbin angin tanpa silinder pengganggu. Pada posisi $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment*, karena penempatan silinder pengganggu diduga dapat mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen. Hal ini diduga dapat menunda titik separasi yang menyebabkan daerah *wake* akan semakin sempit. Semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan, maka semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu turbin, sehingga torsi yang dihasilkan turbin semakin besar dan akan menghasilkan nilai *coefficient of moment* yang besar pula. Selain itu juga terjadi pengurangan gaya *drag* pada

returning blade karena terjadi pengurangan *pressure drop*. Pada posisi $y/D = 0,0$ nilai *coefficient of moment* lebih rendah dibanding *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, hal ini karena pada posisi $y/D = 0,0$ tepat pada diameter sudu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade*, oleh sebab itu pada posisi ini tidak efektif menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat. Hal ini juga diikuti dengan tidak meningkatnya nilai torsi yang menyebabkan nilai *coefficient of moment* tidak meningkat pula. Sedangkan pada posisi $y/D = 0,25$, silinder pengganggu tidak sepenuhnya mengganggu *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang, yang menyebabkan selisih antara kedua sudu tidak meningkat dan nilai *coefficient of moment* tidak meningkat.

4.4.3.2 Analisa Perbandingan *Coefficient of Moment* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa *coefficient of moment* pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, analisa *coefficient of moment* pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$, $y/D = 0,25$ dan $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$. Adapun nilai dari *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius ini didapat dari nilai torsi dinamis dari turbin dibagi dengan tekanan dinamis aliran bebas dikalikan luas penampang turbin dan dikalikan dengan setengah diameter turbin $\left(C_m = \frac{Td}{\frac{1}{2}\rho AU^2 R} \right)$. Nilai torsi dinamis didapatkan dari pengukuran

menggunakan *brake dynamometer*. Setelah mendapatkan nilai torsi dinamis, maka dilakukan perhitungan yang kemudian akan didapatkan nilai dari *coefficient of moment* dari turbin angin Savonius. Adapun grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* dapat dilihat pada gambar 4.12 berikut ini.



Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 14,5 \times 10^4$

Gambar 4.12 menunjukkan grafik nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio* pada $Re = 14,5 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik adalah *linear* yang cenderung menurun. Berdasarkan grafik diatas, secara umum dapat dilihat bahwa turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,25$ memiliki nilai *coefficient of moment* maksimum tertinggi, sedangkan nilai *coefficient of moment* maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$. Pada *Reynolds number* $14,5 \times 10^4$,

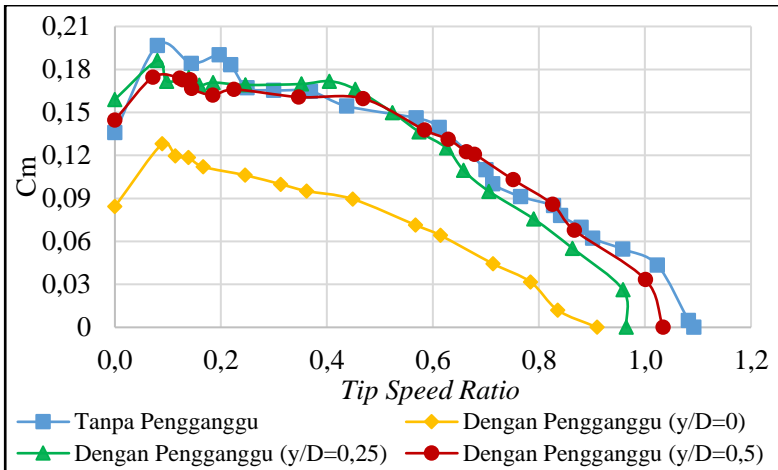
turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum sebesar 0,23 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,11. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$ menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum terendah sebesar 0,21 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,08. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,25$ menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum tertinggi sebesar 0,24 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,16. Sedangkan nilai *coefficient of moment* maksimum saat turbin dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,22 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,18.

Berdasarkan analisa perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$, secara umum penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk semua posisi y/D tidak efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of moment* (C_m) dibandingkan turbin tanpa pengganggu. Hal tersebut terjadi dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik. Selain itu, kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius berpengganggu sangat berpengaruh terhadap *coefficient of moment* dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin semakin rendah. Pada posisi $y/D = 0,0$ nilai *coefficient of moment* lebih rendah dibanding *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, hal ini karena pada posisi $y/D = 0,0$ sejajar dengan sumbu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade*, oleh sebab itu pada posisi ini tidak efektif menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat. Hal ini juga diikuti dengan tidak meningkatnya nilai torsi yang menyebabkan nilai *coefficient of moment* tidak meningkat pula. Sedangkan pada posisi $y/D = 0,25$, silinder pengganggu tidak sepenuhnya mengganggu *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang, yang

menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat dan nilai *coefficient of moment* tidak meningkat.

4.4.3.3 Analisa Perbandingan *Coefficient of Moment* antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 17,8 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa *coefficient of moment* pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, analisa *coefficient of moment* pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$, $y/D = 0,25$ dan $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$. Adapun nilai dari *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius ini didapat dari nilai torsi dinamis dari turbin dibagi dengan tekanan dinamis aliran bebas dikalikan luas penampang turbin dan dikalikan dengan setengah diameter turbin $\left(C_m = \frac{Td}{\frac{1}{2}\rho AU^2 R} \right)$. Nilai torsi dinamis didapatkan dari pengukuran menggunakan *brake dynamometer*. Setelah mendapatkan nilai torsi dinamis, maka dilakukan perhitungan yang kemudian akan didapatkan nilai dari *coefficient of moment* dari turbin angin Savonius. Adapun grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* dapat dilihat pada gambar 4.13 berikut ini.



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 17,8 \times 10^4$

Gambar 4.13 menunjukkan grafik nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi nilai *tip speed ratio* pada $Re = 17,8 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa *trendline* dari grafik adalah *linear* yang cenderung menurun. Berdasarkan grafik diatas, secara umum dapat dilihat bahwa turbin tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *coefficient of moment* maksimum tertinggi. Sedangkan nilai *coefficient of moment* maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,0$. Pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum tertinggi sebesar 0,19 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,08. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,0$ menghasilkan nilai *coefficient of moment* maksimum terendah sebesar 0,13 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,09. Turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,25$ menghasilkan nilai *coefficient of moment*

maksimum sebesar 0,19 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,08. Sedangkan nilai *coefficient of moment* maksimum yang diperoleh saat turbin dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,17 yang dicapai saat *tip speed ratio* 0,07.

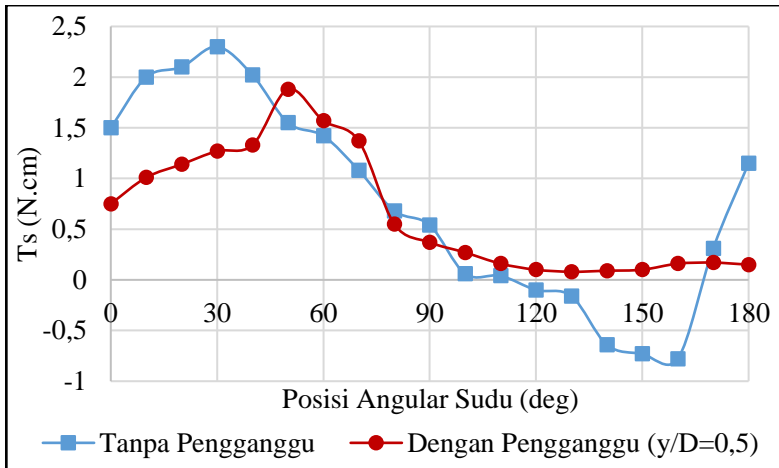
Berdasarkan analisa perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$, secara umum penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk semua posisi y/D tidak efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of moment* (C_m) dibandingkan turbin tanpa pengganggu. Hal tersebut terjadi dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik. Selain itu, kecepatan angin yang mengenai turbin angin Savonius berpengganggu sangat berpengaruh terhadap *coefficient of moment* dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka *coefficient of moment* yang dihasilkan oleh turbin semakin rendah. Pada posisi $y/D = 0,0$ nilai *coefficient of moment* lebih rendah dibanding *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, hal ini karena pada posisi $y/D = 0,0$ sejajar dengan sumbu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade*, oleh sebab itu pada posisi ini tidak efektif menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat. Hal ini juga diikuti dengan tidak meningkatnya nilai torsi yang menyebabkan nilai *coefficient of moment* tidak meningkat pula. Sedangkan pada posisi $y/D = 0,25$, silinder pengganggu tidak sepenuhnya mengganggu *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang, yang menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat dan nilai *coefficient of moment* tidak meningkat.

4.4.4 Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai analisa nilai torsi statis antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu pada 3 variasi *Reynolds number*, yaitu $Re = 9,7 \times 10^4$, $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $Re = 17,8 \times 10^4$, yang masing-masing menggunakan variasi $y/D = 0,5$ untuk turbin yang berpengganggu dan pada keadaan turbin tanpa pengganggu. Berikut merupakan penjelasannya.

4.4.4.1 Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu yang ditinjau pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, analisa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° terhadap bidang tegak lurus aliran udara dan tanpa adanya pembebanan (turbin dalam keadaan diam). Pengujian dilakukan dengan menggunakan *torquemeter digital*. Uji torsi statis dilakukan pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° sampai sudut 180° dengan kenaikan 10° tiap pengujian. Adapun grafik perbandingan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu dapat dilihat pada gambar 4.14 berikut ini.



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Gambar 4.14 menunjukkan grafik nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu pada $Re = 9,7 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa turbin tanpa silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis maksimum tertinggi. Sedangkan nilai torsi statis maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$. Pada *Reynolds number* $= 9,7 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai torsi statis maksimum tertinggi sebesar 2,3 N.cm pada posisi angular sudu = 30° dan nilai torsi statis maksimum terendah adalah saat turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$, menghasilkan nilai torsi statis maksimum terendah sebesar 1,88 N.cm pada posisi angular sudu = 50° . Tetapi saat posisi angular sudu = 50° , 60° , 70° , 100° , 110° , 120° , 130° , 140° , 150° dan 160° turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ memiliki nilai torsi statis yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai torsi statis maksimum

yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu 1,88 N.cm pada posisi angular sudu = 50° , sedangkan pada posisi angular sudu yang sama, turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 1,55 N.cm. Pada posisi angular sudu = 60° , turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 1,57 N.cm, sedangkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 1,42 N.cm. Pada posisi angular sudu = 70° , turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 1,37 N.cm, sedangkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 1,08 N.cm. Sedangkan untuk posisi angular sudu terendah, terdapat pada posisi angular sudu = 130° turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$, menghasilkan nilai torsi statis minimum tertinggi sebesar 0,08 N.cm. Untuk turbin angin Savonius tanpa pengganggu, pada posisi angular sudu terendah mempunyai nilai torsi statis minimum terendah atau yang lebih kecil daripada turbin dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ yaitu sebesar -0,78 N.cm yang dicapai saat posisi angular sudu = 160° . Nilai minus ini menandakan bahwa kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu kurang baik.

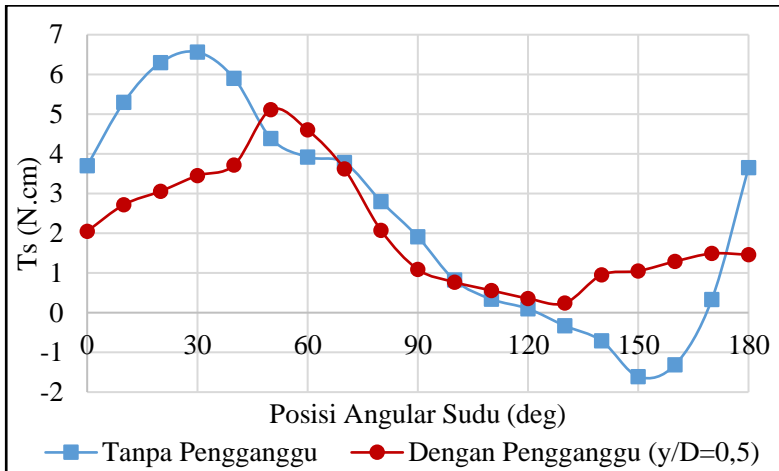
Berdasarkan perbandingan tersebut, grafik diatas memiliki posisi angular sudu tertinggi dan terendah yang tidak sama tetapi *trendline* dari grafik cenderung sama. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,5$ efektif untuk meningkatkan nilai torsi statis (T_s) dibandingkan turbin tanpa pengganggu saat posisi angular sudu = 50° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,21 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 60° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,11 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 70° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,27 kali dari torsi statis turbin angin Savonius

tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 100° nilai torsi statis meningkat sebesar 4,5 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 110° nilai torsi statis meningkat sebesar 4 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Sedangkan pada posisi angular sudu yang lain, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,5$ tidak efektif untuk meningkatkan nilai torsi statis (T_s) dibandingkan turbin tanpa pengganggu. Tetapi kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ pada $y/D = 0,5$ dengan jarak $S/D = 1,4$ lebih baik dari turbin tanpa silinder pengganggu, karena torsi statis bernilai positif pada semua posisi sudut. Hal ini dikarenakan turbin mampu menangkap angin dari berbagai posisi.

4.4.4.2 Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 14,5 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu yang ditinjau pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, analisa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° terhadap bidang tegak lurus aliran udara dan tanpa adanya pembebanan (turbin dalam keadaan diam). Pengujian dilakukan dengan menggunakan *torquemeter digital*. Uji torsi statis dilakukan pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° sampai sudut 180° dengan kenaikan 10° tiap pengujian. Adapun grafik perbandingan nilai torsi statis turbin

angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu dapat dilihat pada gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu pada $Re = 14,5 \times 10^4$

Gambar 4.15 menunjukkan grafik nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu pada $Re = 14,5 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa turbin tanpa silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis maksimum tertinggi. Sedangkan nilai torsi statis maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$. Pada *Reynolds number* $= 14,5 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai torsi statis maksimum tertinggi sebesar 6,56 N.cm pada posisi angular sudu $= 30^\circ$ dan nilai torsi statis maksimum terendah adalah saat turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$, menghasilkan nilai torsi statis maksimum terendah sebesar 5,11 N.cm pada posisi angular sudu $= 50^\circ$. Tetapi saat posisi angular sudu $= 50^\circ, 60^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ$ dan 170° turbin angin

Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ memiliki nilai torsi statis yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai torsi statis maksimum yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu 5,11 N.cm pada posisi angular sudu = 50° , sedangkan pada posisi angular sudu yang sama, turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 4,39 N.cm. Pada posisi angular sudu = 60° , turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 4,6 N.cm, sedangkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 3,92 N.cm. Sedangkan untuk posisi angular sudu terendah, terdapat pada posisi angular sudu = 130° turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$, menghasilkan nilai torsi statis minimum tertinggi sebesar 0,24 N.cm. Untuk turbin angin Savonius tanpa pengganggu, pada posisi angular sudu terendah mempunyai nilai torsi statis minimum terendah atau yang lebih kecil daripada turbin dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ yaitu sebesar -1,61 N.cm yang dicapai saat posisi angular sudu = 150° . Nilai minus ini menandakan bahwa kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu kurang baik.

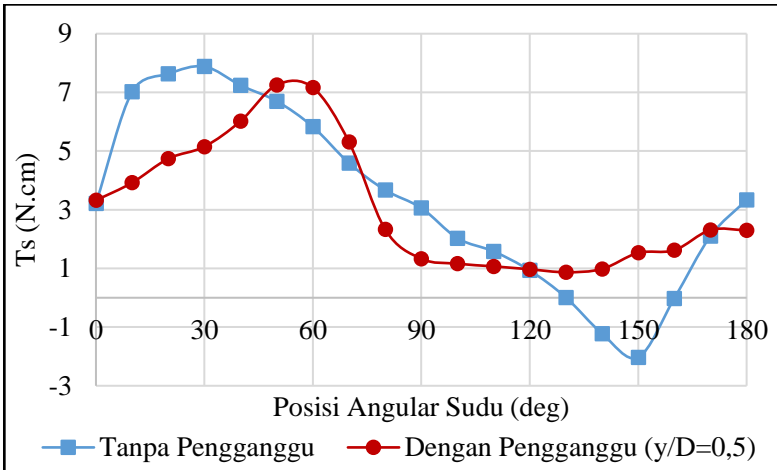
Berdasarkan perbandingan tersebut, grafik diatas memiliki posisi angular sudu tertinggi dan terendah yang tidak sama tetapi *trendline* dari grafik cenderung sama. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,5$ efektif untuk meningkatkan nilai torsi statis (T_s) dibandingkan turbin tanpa pengganggu saat posisi angular sudu = 50° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,16 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 60° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,17 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 110° nilai torsi statis meningkat sebesar 1,65 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 120° nilai

torsi statis meningkat sebesar 3,6 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dan saat posisi angular sudu = 170° nilai torsi statis meningkat sebesar 4,5 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Sedangkan pada posisi angular sudu yang lain, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,5$ tidak efektif untuk meningkatkan nilai torsi statis (T_s) dibandingkan turbin tanpa pengganggu. Tetapi kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ pada $y/D = 0,5$ dengan jarak $S/D = 1,4$ lebih baik dari turbin tanpa silinder pengganggu, karena torsi statis bernilai positif pada semua posisi sudut. Hal ini dikarenakan turbin mampu menangkap angin dari berbagai posisi.

4.4.4.3 Analisa Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 17,8 \times 10^4$

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai perbandingan nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi besar sudut yang ditinjau pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$. Analisa perbandingan yang akan dilakukan adalah analisa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, analisa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius saat silinder pengganggu diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$, masing-masing analisa tersebut ditinjau saat *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° terhadap bidang tegak lurus aliran udara dan tanpa adanya pembebanan (turbin dalam keadaan diam). Pengujian dilakukan dengan menggunakan *torquemeter digital*. Uji torsi statis dilakukan pada saat *blade* dari turbin angin Savonius berada pada sudut 0° sampai sudut 180° dengan kenaikan 10° tiap pengujian. Adapun grafik perbandingan nilai torsi statis turbin

angin Savonius tanpa dan dengan pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu dapat dilihat pada gambar 4.16 berikut ini.



Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Posisi Angular Sudu pada $Re = 17,8 \times 10^4$

Gambar 4.16 menunjukkan grafik nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi posisi angular sudu pada $Re = 17,8 \times 10^4$. Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa turbin tanpa silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis maksimum tertinggi. Sedangkan nilai torsi statis maksimum terendah terjadi saat turbin dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$. Pada *Reynolds number* $= 17,8 \times 10^4$, turbin tanpa silinder pengganggu menghasilkan nilai torsi statis maksimum tertinggi sebesar 7,88 N.cm pada posisi angular sudu = 30° dan nilai torsi statis maksimum terendah adalah saat turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$, menghasilkan nilai torsi statis maksimum terendah sebesar 7,25 N.cm pada posisi angular sudu 50° . Tetapi saat posisi angular sudu = 50° , 60° , 70° , 120° , 130° , 140° , 150° , 160° dan 170° turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ memiliki

nilai torsi statis yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai torsi statis maksimum yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu 7,25 N.cm pada posisi angular sudu = 50° , sedangkan pada posisi angular sudu yang sama, turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 6,7 N.cm. Pada posisi angular sudu = 60° , turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 7,16 N.cm, sedangkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 5,83 N.cm. Pada posisi angular sudu = 70° , turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 5,31 N.cm, sedangkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis sebesar 4,59 N.cm. Sedangkan untuk posisi angular sudu terendah, terdapat pada posisi angular sudu = 130° turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$, menghasilkan nilai torsi statis minimum tertinggi sebesar 0,87 N.cm. Untuk turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, pada posisi angular sudu terendah mempunyai nilai torsi statis minimum terendah atau yang lebih kecil daripada turbin dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ yaitu sebesar -2,03 N.cm yang dicapai saat posisi angular sudu = 150° . Nilai minus ini menandakan bahwa kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu kurang baik.

Berdasarkan perbandingan tersebut, grafik diatas memiliki posisi angular sudu tertinggi dan terendah yang tidak sama tetapi *trendline* dari grafik cenderung sama. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa untuk $d/D = 0,5$ pada $S/D = 1,4$ dan *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,5$ efektif untuk meningkatkan nilai torsi statis (T_s) dibandingkan turbin tanpa pengganggu saat posisi angular sudu = 50° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,08 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 60° yaitu nilai torsi statis meningkat sebesar 1,23 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder

pengganggu, saat posisi angular sudu = 70° nilai torsi statis meningkat sebesar 1,16 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, saat posisi angular sudu = 120° nilai torsi statis meningkat sebesar 1,04 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dan saat posisi angular sudu = 170° nilai torsi statis meningkat sebesar 1,1 kali dari torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Sedangkan pada posisi angular sudu yang lain, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk posisi $y/D = 0,5$ tidak efektif untuk meningkatkan nilai torsi statis (T_s) dibandingkan turbin tanpa pengganggu. Tetapi kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ pada $y/D = 0,5$ dengan jarak $S/D = 1,4$ lebih baik dari turbin tanpa silinder pengganggu, karena torsi statis bernilai positif pada semua posisi sudut. Hal ini dikarenakan turbin mampu menangkap angin dari berbagai posisi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan dari penelitian Tugas Akhir ini, mengenai pengaruh penempatan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ dan untuk variasi *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ terhadap performa turbin angin Savonius, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada posisi $y/D = 0,5$ dengan *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ efektif meningkatkan nilai putaran maksimal sebesar 387,55 rpm, nilai putaran ini meningkat sebesar 1,08 kali dari putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.
2. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada posisi $y/D = 0,5$, dengan *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ efektif meningkatkan nilai *coefficient of power* (CoP) maksimal sebesar 0,167, nilai *coefficient of power* ini meningkat sebesar 1,09 kali dari *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.
3. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada posisi $y/D = 0,5$, dengan *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$ efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment* (Cm) sebesar 0,279, nilai *coefficient of moment* ini meningkat sebesar 1,17 kali dari *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.
4. Kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D = 0,5$ dan $Re = 9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$ lebih baik daripada

turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, karena torsi statis pada turbin angin Savonius berpengganggu bernilai positif pada semua sudut ($0^\circ - 180^\circ$). Jadi, turbin mempunyai kemampuan *self starting* yang baik di semua posisi sudut.

5. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ di $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ serta pada $Re = 9,7 \times 10^4$ di $y/D = 0,0; 0,25$ tidak efektif meningkatkan nilai putaran, nilai *coefficient of power* (CoP) dan nilai *coefficient of moment* (Cm).

5.2 Saran

Adapun saran mengenai penelitian yang telah dilakukan agar penelitian menjadi lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Konstruksi alat uji sebaiknya dibuat lebih *rigid*, sehingga mampu menahan getaran saat turbin beroperasi pada kecepatan tinggi.
2. Alat ukur yang digunakan sebaiknya memiliki ketelitian kurang dari 10 gram dan memiliki kestabilan baca yang baik.
3. Pengambilan data sebaiknya dilakukan pada satu kondisi yang sama.
4. Pengukuran kecepatan aliran fluida (angin) dilakukan secara berkala, untuk memastikan tidak ada perubahan kecepatan selama pengambilan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., Atilgan, M. & Ozdamar, A., 2008. **An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance with Curtaining.** *Experimental Thermal and Fluid Science*, Issue 32, pp. 1673-1678.
- Brar, J. & Bansal, R., 2004. **Theory of Machines.** New Delhi: Firewall Media.
- BTM Consult ApS. 2005. **International Wind Energy Development World Market Update 2004.** <URL: [http: www.rechsteiner basel.ch/uploads/media/btm_Pressrelease.pdf](http://www.rechsteinerbasel.ch/uploads/media/btm_Pressrelease.pdf)>.
- Daryanto, Y., 2007. **Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.** *Energi Angin*, pp. 5-6.
- Fernando, D., 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu di Depan Returning Blade Turbin Angin Savonius terhadap Performa Turbin "Studi Kasus untuk Rasio $d/D = 0,75$; $S/D = 1,5 \leq S/D \leq 2,4$, dan Variasi Bilangan Reynolds 60000; 75000; 90000"**. Surabaya: ITS.
- Fox, M., Pritchard, P. & Leylegian, J., 2011. **Introduction of Fluid Mechanics.** 8th penyunt. USA: John Wiley & Sons.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). 2014. **Outlook Energi Indonesia 2014.** Jakarta.
- Mahmoud, N., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2010. **An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance.** *Alexandria Engineering Journal*, Issue 51, pp. 19-25.

- Mohamed, M., Janiga, G., Pap, E. & Thevenin, D., 2010. **Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade.** *Renewable Energy*, Issue 35, pp. 2618-2626.
- The Renewable Energy Website. 2014. **Savonius-Wind-Turbines.** <URL: <http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm>>.
- Triyogi, Y., Suprayogi, D. & Spirda, E., 2009. **Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of an I-Type Bluff Body as Passive Control.** *JMES1543 IMechE*, Volume 223, pp. 2291-2296.
- Yuwono, T. et al., 2018. **Numerical study on the effect of width of single curtain on the performance of Savonius wind turbine.** *Matec Web of Conference*, 154(01110), pp. 1-3.
- Yuwono, T. et al., 2018. **The effect of single curtain on the performance of Savonius wind turbine.** *AIP Conference Proceeding*, 1983(1), pp. 020023-1 - 6.

LAMPIRAN

Tabel A1. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = $9,7 \times 10^4$

U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
5,01	374,57	39,20	0	0,00	0,0095	0,08932	1,1772	1,19	0,000	0,000	0,000
5,01	353,90	37,04	15	190,00	0,0095	0,08932	1,1772	1,12	0,016	0,091	0,081
5,01	326,70	34,19	16	300,00	0,0095	0,08932	1,1772	1,04	0,026	0,137	0,132
5,01	303,35	31,75	18	333,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,96	0,029	0,141	0,147
5,01	287,01	30,04	20	383,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,91	0,034	0,154	0,169
5,01	266,39	27,88	25	410,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,84	0,036	0,152	0,180
5,01	230,75	24,15	35	480,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,73	0,041	0,151	0,207
5,01	185,89	19,46	45	553,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,59	0,047	0,139	0,237
5,01	138,47	14,49	50	563,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,44	0,048	0,105	0,239
5,01	125,53	13,14	55	550,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,40	0,046	0,092	0,230
5,01	101,94	10,67	65	600,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,32	0,050	0,080	0,249
5,01	89,92	9,41	75	626,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,28	0,051	0,073	0,257
5,01	86,85	9,09	85	650,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,28	0,053	0,072	0,263
5,01	74,29	7,78	95	713,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,24	0,058	0,068	0,288
5,01	67,46	7,06	105	702,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,21	0,056	0,059	0,278
5,01	56,18	5,88	115	700,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,18	0,055	0,048	0,272
5,01	53,46	5,60	125	706,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,17	0,054	0,046	0,271
5,01	47,95	5,02	135	773,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,15	0,059	0,045	0,297
5,01	45,86	4,80	145	780,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,15	0,059	0,043	0,296
5,01	42,27	4,42	155	800,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,13	0,060	0,040	0,300
5,01	32,67	3,42	165	800,00	0,0095	0,08932	1,1772	0,10	0,059	0,031	0,296
5,01	29,13	3,05	175	783,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,09	0,057	0,026	0,283
5,01	0,00	0,00	185	426,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,00	0,023	0,000	0,113

Tabel A2. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = $14,5 \times 10^4$

U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
7,5	609,20	63,763	0	0	0,0095	0,08932	1,1772	1,290	0,000	0,000	0,000
7,5	608,43	63,683	15	50	0,0095	0,08932	1,1772	1,288	0,003	0,009	0,007
7,5	591,25	61,885	35	206,667	0,0095	0,08932	1,1772	1,252	0,016	0,045	0,036
7,5	558,83	58,491	55	351,333	0,0095	0,0893	1,1772	1,183	0,028	0,073	0,062
7,5	531,25	55,605	75	439,333	0,0095	0,0893	1,1772	1,125	0,034	0,085	0,076
7,5	469,69	49,161	95	609,333	0,0095	0,0893	1,1772	0,994	0,048	0,106	0,107
7,5	416,36	43,579	115	840,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,881	0,068	0,133	0,151
7,5	333,97	34,956	135	991,333	0,0095	0,0893	1,1772	0,707	0,080	0,126	0,178
7,5	329,83	34,522	155	1006,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,698	0,079	0,123	0,177
7,5	298,18	31,210	175	1020,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,631	0,079	0,111	0,176
7,5	278,75	29,176	195	1066,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,590	0,081	0,107	0,181
7,5	221,57	23,191	215	1148,667	0,0095	0,0893	1,1772	0,469	0,087	0,091	0,194
7,5	192,91	20,191	235	1197,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,408	0,090	0,082	0,200
7,5	146,65	15,350	255	1250,667	0,0095	0,0893	1,1772	0,310	0,093	0,064	0,207
7,5	120,78	12,642	275	1334,667	0,0095	0,0893	1,1772	0,256	0,099	0,056	0,220
7,5	104,76	10,965	295	1392,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,222	0,102	0,051	0,228
7,5	87,07	9,114	315	1428,667	0,0095	0,0893	1,1772	0,184	0,104	0,043	0,231
7,5	52,07	5,450	335	1451,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,110	0,104	0,026	0,232
7,5	46,34	4,850	355	1450,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,098	0,102	0,022	0,227
7,5	23,66	2,477	375	1490,000	0,0095	0,0893	1,1772	0,050	0,104	0,012	0,232
7,5	0,00	0,000	385	1223,333	0,0095	0,0893	1,1772	0,000	0,078	0,000	0,174

Tabel A3. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = $17,8 \times 10^4$

U (m/s)	n (rad/s)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
9,2	632,86	66,24	0	0	0,0095	0,08932	1,1772	1,092	0,000	0,000	0,000
9,2	626,90	65,62	15	50	0,0095	0,08932	1,1772	1,082	0,003	0,005	0,005
9,2	592,91	62,06	35	350	0,0095	0,08932	1,1772	1,023	0,029	0,045	0,043
9,2	555,20	58,11	55	450	0,0095	0,08932	1,1772	0,958	0,037	0,052	0,055
9,2	522,18	54,65	75	525	0,0095	0,08932	1,1772	0,901	0,042	0,056	0,062
9,2	509,67	53,35	95	600	0,0095	0,08932	1,1772	0,880	0,047	0,061	0,070
9,2	487,25	51,00	115	680	0,0095	0,08932	1,1772	0,841	0,053	0,066	0,078
9,2	479,37	50,17	135	750	0,0095	0,08932	1,1772	0,827	0,057	0,070	0,085
9,2	443,43	46,41	155	816	0,0095	0,08932	1,1772	0,765	0,062	0,070	0,091
9,2	412,91	43,22	175	900	0,0095	0,08932	1,1772	0,713	0,068	0,071	0,100
9,2	405,77	42,47	195	991,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,700	0,074	0,077	0,110
9,2	354,57	37,11	215	1225	0,0095	0,08932	1,1772	0,612	0,094	0,085	0,139
9,2	329,16	34,45	235	1293,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,568	0,099	0,083	0,146
9,2	253,45	26,53	255	1373,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,437	0,104	0,068	0,154
9,2	213,88	22,39	275	1468,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,369	0,111	0,061	0,165
9,2	173,35	18,14	295	1493,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,299	0,112	0,049	0,165
9,2	144,34	15,11	315	1526,67	0,0095	0,08932	1,1772	0,249	0,113	0,042	0,167
9,2	126,74	13,27	335	1663,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,219	0,124	0,040	0,183
9,2	113,89	11,92	355	1733,33	0,0095	0,08932	1,1772	0,197	0,128	0,037	0,190
9,2	83,59	8,75	375	1710	0,0095	0,08932	1,1772	0,144	0,124	0,027	0,184
9,2	46,35	4,85	395	1820	0,0095	0,08932	1,1772	0,080	0,133	0,016	0,197
9,2	0,00	0,00	415	1400	0,0095	0,08932	1,1772	0,000	0,092	0,000	0,136

Tabel A4. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Penganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0$ pada *Reynolds Number* $= 9,7 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
29	5,01	320,853	33,5826	0	0,00	0,0095	0,08932	1,1756	1,017	0,000	0,000	0,000
29	5,01	296,747	31,0595	15	150,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,940	0,013	0,059	0,063
29	5,01	266,78	27,923	25	240,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,845	0,020	0,085	0,100
29	5,01	251,973	26,3732	35	279,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,799	0,023	0,091	0,114
29	5,01	219,88	23,0141	45	383,67	0,0095	0,08932	1,1756	0,697	0,032	0,110	0,158
29	5,01	178,593	18,6928	55	427,33	0,0095	0,08932	1,1756	0,566	0,035	0,098	0,174
29	5,01	161,06	16,8576	65	454,67	0,0095	0,08932	1,1756	0,510	0,036	0,093	0,182
29	5,01	129,26	13,5292	85	490,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,410	0,038	0,077	0,189
29	5,01	114,64	11,999	95	513,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,363	0,039	0,071	0,195
29	5,01	107,38	11,2391	105	529,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,340	0,040	0,067	0,198
29	5,01	96,26	10,0752	115	546,67	0,0095	0,08932	1,1756	0,305	0,040	0,061	0,201
29	5,01	83,12	8,69989	125	562,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,263	0,041	0,054	0,204
29	5,01	69,0333	7,22549	135	609,33	0,0095	0,08932	1,1756	0,219	0,044	0,048	0,221
29	5,01	68,6571	7,18611	145	637,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,218	0,046	0,050	0,229
29	5,01	0	0	155	560,00	0,0095	0,08932	1,1756	0,000	0,038	0,000	0,189

Tabel A5. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan
Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0$ pada
Reynolds Number = $14,5 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
30	7,5	520,89	54,519	0	0,00	0,0095	0,08932	1,1721	1,103	0,000	0,000	0,000
30	7,5	510,07	53,388	15	100,00	0,0095	0,08932	1,1721	1,080	0,008	0,019	0,018
30	7,5	508,19	53,191	35	200,00	0,0095	0,08932	1,1721	1,076	0,015	0,037	0,034
30	7,5	494,37	51,744	55	310,00	0,0095	0,08932	1,1721	1,047	0,024	0,056	0,053
30	7,5	479,40	50,177	75	381,00	0,0095	0,08932	1,1721	1,015	0,029	0,065	0,064
30	7,5	448,04	46,895	95	448,67	0,0095	0,08932	1,1721	0,949	0,033	0,070	0,074
30	7,5	420,40	44,002	115	500,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,890	0,036	0,071	0,080
30	7,5	356,01	37,262	155	670,67	0,0095	0,08932	1,1721	0,754	0,048	0,081	0,108
30	7,5	339,15	35,498	195	736,67	0,0095	0,08932	1,1721	0,718	0,050	0,081	0,113
30	7,5	313,79	32,843	235	852,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,664	0,058	0,086	0,129
30	7,5	309,09	32,352	255	899,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,654	0,060	0,088	0,134
30	7,5	295,40	30,919	275	948,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,625	0,063	0,088	0,140
30	7,5	276,22	28,911	295	984,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,585	0,064	0,084	0,144
30	7,5	262,85	27,512	315	994,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,556	0,063	0,079	0,142
30	7,5	222,70	23,309	355	1076,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,471	0,067	0,071	0,150
30	7,5	182,71	19,123	395	1197,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,387	0,075	0,065	0,167
30	7,5	178,53	18,686	415	1206,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,378	0,074	0,062	0,165
30	7,5	124,84	13,067	495	1416,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,264	0,086	0,051	0,192
30	7,5	118,63	12,416	515	1432,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,251	0,085	0,048	0,191
30	7,5	103,37	10,819	535	1540,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,219	0,094	0,046	0,210
30	7,5	78,10	8,174	555	1560,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,165	0,094	0,035	0,210
30	7,5	57,69	6,038	575	1582,00	0,0095	0,08932	1,1721	0,122	0,094	0,026	0,210
30	7,5	38,60	4,040	595	1609,33	0,0095	0,08932	1,1721	0,082	0,095	0,017	0,212
30	7,5	0,00	0,000	615	1516,67	0,0095	0,08932	1,1721	0,000	0,084	0,000	0,188

Tabel A6. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder
Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,0$ pada *Reynolds Number* $= 17,8 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rad/s)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	9,1	521,267	54,559	0	0,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,910	0,000	0,000	0,000
28,2	9,1	478,847	50,119	15	100,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,836	0,008	0,010	0,012
28,2	9,1	449,2	47,016	25	250,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,784	0,021	0,025	0,032
28,2	9,1	408,7	42,777	35	350,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,713	0,029	0,032	0,044
28,2	9,1	352,02	36,845	45	500,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,614	0,042	0,039	0,064
28,1	9,1	325,04	34,021	55	561,33	0,0095	0,08932	1,17875	0,567	0,047	0,040	0,071
28,1	9,1	257,167	26,917	65	700,00	0,0095	0,08932	1,17875	0,449	0,059	0,040	0,089
28,2	9,1	207,367	21,704	75	750,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,362	0,063	0,034	0,095
28,2	9,1	179,36	18,773	85	793,33	0,0095	0,08932	1,1784	0,313	0,066	0,031	0,100
28,2	9,1	140,793	14,736	105	858,33	0,0095	0,08932	1,1784	0,246	0,070	0,026	0,106
28,1	9,1	95,56	10,002	125	920,00	0,0095	0,08932	1,17875	0,167	0,074	0,019	0,112
28,2	9,1	79,38	8,308	145	985,00	0,0095	0,08932	1,1784	0,139	0,078	0,016	0,118
28,2	9,1	65,42	6,847	175	1023,33	0,0095	0,08932	1,1784	0,114	0,079	0,014	0,120
28,2	9,1	51,14	5,353	225	1133,33	0,0095	0,08932	1,1784	0,089	0,085	0,011	0,128
28,1	9,1	0	0,000	435	1033,33	0,0095	0,08932	1,17875	0,000	0,056	0,000	0,084

Tabel A7. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,25$ pada *Reynolds Number* $= 9,7 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28	5,01	288,107	30,155	0	0,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,913	0,000	0,000	0,000
28	5,01	265,107	27,748	15	160,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,840	0,014	0,057	0,067
28	5,01	246,447	25,795	25	260,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,781	0,022	0,085	0,109
28	5,01	213,453	22,341	35	347,333	0,0095	0,08932	1,1791	0,676	0,029	0,098	0,145
28	5,01	194,873	20,397	45	454,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,618	0,038	0,117	0,190
28	5,01	169,380	17,728	55	500,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,537	0,041	0,111	0,207
28	5,01	160,627	16,812	65	529,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,509	0,043	0,110	0,216
28	5,01	137,927	14,436	75	551,333	0,0095	0,08932	1,1791	0,437	0,044	0,097	0,221
28	5,01	116,393	12,183	85	560,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,369	0,044	0,081	0,221
28	5,01	106,764	11,175	95	583,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,338	0,045	0,077	0,227
28	5,01	89,380	9,355	105	592,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,283	0,045	0,064	0,226
28	5,01	73,600	7,703	115	598,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,233	0,045	0,052	0,224
28	5,01	67,333	7,048	125	612,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,213	0,045	0,048	0,226
28	5,01	51,713	5,413	145	650,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,164	0,047	0,038	0,235
28	5,01	40,993	4,291	165	669,333	0,0095	0,08932	1,1791	0,130	0,047	0,030	0,234
28	5,01	0,000	0,000	205	500,000	0,0095	0,08932	1,1791	0,000	0,027	0,000	0,137

Tabel A8. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,25$ pada *Reynolds Number* $= 14,5 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	τ_d (Nm)	CoP	Cm
33,5	7,5	531,70	55,651	0	0,000	0,0095	0,08932	1,15985	1,126	0,000	0,000	0,000
33,5	7,5	520,09	54,436	15	50,000	0,0095	0,08932	1,15985	1,101	0,003	0,008	0,007
33,5	7,5	502,13	52,556	35	200,000	0,0095	0,08932	1,15985	1,063	0,015	0,037	0,035
33,5	7,5	465,86	48,760	55	300,000	0,0095	0,08932	1,15985	0,986	0,023	0,051	0,052
33,5	7,5	453,87	47,505	75	400,000	0,0095	0,08932	1,15985	0,961	0,030	0,066	0,069
33,5	7,5	427,78	44,774	95	480,000	0,0095	0,08932	1,15985	0,906	0,036	0,074	0,081
33,5	7,5	405,19	42,410	115	589,333	0,0095	0,08932	1,15985	0,858	0,044	0,086	0,100
33,5	7,5	380,88	39,865	135	650,000	0,0095	0,08932	1,15985	0,806	0,048	0,088	0,109
33,5	7,5	366,50	38,360	155	703,333	0,0095	0,08932	1,15985	0,776	0,051	0,090	0,116
33,5	7,5	346,39	36,255	175	789,333	0,0095	0,08932	1,15985	0,733	0,057	0,095	0,130
33,5	7,5	304,99	31,922	215	1002,000	0,0095	0,08932	1,15985	0,646	0,073	0,107	0,166
33,5	7,5	257,69	26,972	255	1148,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,546	0,083	0,103	0,188
33,5	7,5	249,86	26,152	275	1190,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,529	0,085	0,102	0,193
33,5	7,5	223,37	23,379	295	1261,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,473	0,090	0,096	0,204
33,5	7,5	191,60	20,054	315	1291,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,406	0,091	0,084	0,206
33,5	7,5	180,61	18,903	335	1334,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,382	0,093	0,081	0,211
33,5	7,5	123,11	12,885	355	1386,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,261	0,096	0,057	0,218
33,5	7,5	109,37	11,447	375	1436,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,232	0,099	0,052	0,224
33,5	7,5	103,06	10,787	395	1415,333	0,0095	0,08932	1,15985	0,218	0,095	0,047	0,215
33,5	7,5	90,93	9,517	415	1440,667	0,0095	0,08932	1,15985	0,192	0,096	0,042	0,216
33	7,5	84,35	8,828	435	1516,667	0,0095	0,08932	1,1616	0,179	0,101	0,041	0,228
33	7,5	73,23	7,665	455	1590,000	0,0095	0,08932	1,1616	0,155	0,106	0,037	0,239
33	7,5	0,00	0,000	715	1473,333	0,0095	0,08932	1,1616	0,000	0,071	0,000	0,160

Tabel A9. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,25$ pada *Reynolds Number* $= 17,8 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
29,1	9,1	553,01	57,882	0	0	0,0095	0,08932	1,17525	0,9649	0,0000	0,0000	0,0000
29,1	9,1	549,31	57,494	15	200	0,0095	0,08932	1,17525	0,9584	0,0172	0,0251	0,0261
29,1	9,1	494,83	51,792	35	425	0,0095	0,08932	1,17525	0,8634	0,0363	0,0476	0,0551
29,1	9,1	452,89	47,403	65	600	0,0095	0,08932	1,17525	0,7902	0,0499	0,0598	0,0756
29,1	9,1	404,33	42,320	95	766,667	0,0095	0,08932	1,17525	0,7055	0,0626	0,0670	0,0949
29,2	9,1	376,93	39,452	125	900	0,0095	0,08932	1,1749	0,6577	0,0722	0,0721	0,1096
29,2	9,1	358,52	37,525	165	1050	0,0095	0,08932	1,1749	0,6256	0,0825	0,0783	0,1251
29,2	9,1	328,83	34,417	195	1160	0,0095	0,08932	1,1749	0,5737	0,0899	0,0783	0,1364
29,2	9,1	300,2	31,421	225	1285	0,0095	0,08932	1,1749	0,5238	0,0988	0,0785	0,1499
29,2	9,1	260,09	27,222	255	1430	0,0095	0,08932	1,1749	0,4538	0,1095	0,0754	0,1661
29,2	9,1	232,01	24,283	285	1500	0,0095	0,08932	1,1749	0,4048	0,1132	0,0695	0,1718
29,2	9,1	201,69	21,111	315	1516,333	0,0095	0,08932	1,1749	0,3519	0,1120	0,0598	0,1698
29,2	9,1	141,23	14,782	335	1531,667	0,0095	0,08932	1,1749	0,2464	0,1115	0,0417	0,1692
29,2	9,1	106,34	11,130	385	1593,333	0,0095	0,08932	1,1749	0,1855	0,1126	0,0317	0,1708
29,2	9,1	91,373	9,564	415	1610	0,0095	0,08932	1,1749	0,1594	0,1114	0,0269	0,1690
29,2	9,1	79,813	8,354	445	1678,333	0,0095	0,08932	1,1749	0,1393	0,1149	0,0243	0,1744
29,2	9,1	56,107	5,872	495	1710	0,0095	0,08932	1,1749	0,0979	0,1132	0,0168	0,1718
29,2	9,1	45,987	4,813	535	1851,667	0,0095	0,08932	1,1749	0,0802	0,1227	0,0149	0,1862
29,2	9,1	0	0,000	635	1760	0,0095	0,08932	1,1749	0,0000	0,1048	0,0000	0,1591

Tabel A10. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder
Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,5$ pada *Reynolds Number* = $9,7 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	5,01	404,347	42,322	0	0,000	0,0095	0,08932	1,1784	1,2815	0,0000	0,0000	0,0000
28,2	5,01	387,547	40,563	15	50,000	0,0095	0,08932	1,1784	1,2282	0,0033	0,0200	0,0163
28,3	5,01	373,653	39,109	25	150,000	0,0095	0,08932	1,17805	1,1842	0,0116	0,0689	0,0582
28,2	5,01	356,907	37,356	35	200,000	0,0095	0,08932	1,1784	1,1311	0,0154	0,0868	0,0767
28,2	5,01	348,64	36,491	55	260,000	0,0095	0,08932	1,1784	1,1049	0,0191	0,1053	0,0953
28,3	5,01	336,733	35,245	75	340,000	0,0095	0,08932	1,17805	1,0672	0,0247	0,1316	0,1233
28,5	5,01	328,153	34,347	95	400,000	0,0095	0,08932	1,17735	1,0400	0,0284	0,1477	0,1420
28,5	5,01	296,273	31,010	135	502,667	0,0095	0,08932	1,17735	0,9390	0,0343	0,1607	0,1711
28,7	5,01	264,833	27,719	155	575,000	0,0095	0,08932	1,17665	0,8393	0,0391	0,1642	0,1956
28,9	5,01	237,45	24,853	175	650,000	0,0095	0,08932	1,17595	0,7525	0,0443	0,1666	0,2214
29,1	5,01	224,06	23,452	185	690,000	0,0095	0,08932	1,17525	0,7101	0,0471	0,1672	0,2355
29,5	5,01	209,527	21,930	205	735,000	0,0095	0,08932	1,17385	0,6640	0,0494	0,1643	0,2474
29,8	5,01	198,447	20,771	215	771,667	0,0095	0,08932	1,1728	0,6289	0,0519	0,1636	0,2601
29,9	5,01	191,82	20,077	225	793,667	0,0095	0,08932	1,17245	0,6079	0,0530	0,1616	0,2658
30,1	5,01	179,113	18,747	235	800,000	0,0095	0,08932	1,17175	0,5677	0,0527	0,1500	0,2643
30,2	5,01	162,76	17,036	240	811,000	0,0095	0,08932	1,1714	0,5158	0,0532	0,1378	0,2671
30,3	5,01	141,693	14,831	245	842,000	0,0095	0,08932	1,17105	0,4491	0,0556	0,1255	0,2794
30,5	5,01	125,48	13,134	255	801,333	0,0095	0,08932	1,17035	0,3977	0,0509	0,1017	0,2558
30,8	5,01	110,633	11,580	265	813,333	0,0095	0,08932	1,1693	0,3506	0,0511	0,0901	0,2570
30,8	5,01	100,04	10,471	275	852,667	0,0095	0,08932	1,1693	0,3171	0,0538	0,0858	0,2707
30,8	5,01	78,96	8,264	285	856,000	0,0095	0,08932	1,1693	0,2502	0,0532	0,0670	0,2676
30,8	5,01	64,5733	6,759	295	861,000	0,0095	0,08932	1,1693	0,2046	0,0527	0,0543	0,2653
30,8	5,01	50,6867	5,305	305	900,000	0,0095	0,08932	1,1693	0,1606	0,0555	0,0448	0,2789
30,8	5,01	0	0,000	325	696,667	0,0095	0,08932	1,1693	0,0000	0,0346	0,0000	0,1742

Tabel A11. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder
Penggangu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,5$ pada *Reynolds Number* = $14,5 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
30,9	7,5	512,913	53,685	0	0	0,0095	0,08932	1,16895	1,086	0,000	0,000	0,000
30,9	7,5	485,467	50,812	15	200	0,0095	0,08932	1,16895	1,028	0,017	0,040	0,039
31,1	7,5	454,493	47,570	35	320,333	0,0095	0,08932	1,16825	0,962	0,027	0,057	0,060
31,1	7,5	389,047	40,720	55	520,667	0,0095	0,08932	1,16825	0,824	0,043	0,080	0,097
31,1	7,5	345,987	36,213	75	653,333	0,0095	0,08932	1,16825	0,732	0,054	0,089	0,121
31,2	7,5	311,6	32,614	95	771,667	0,0095	0,08932	1,1679	0,660	0,063	0,093	0,142
31,2	7,5	291,413	30,501	115	815	0,0095	0,08932	1,1679	0,617	0,065	0,090	0,147
31,2	7,5	260,587	27,275	135	891,667	0,0095	0,08932	1,1679	0,552	0,071	0,087	0,158
31,3	7,5	238,713	24,985	155	956	0,0095	0,08932	1,16755	0,505	0,075	0,085	0,168
31,5	7,5	210,413	22,023	195	1041,67	0,0095	0,08932	1,16685	0,445	0,079	0,079	0,177
31,7	7,5	143,52	15,022	215	1113,33	0,0095	0,08932	1,16615	0,304	0,084	0,057	0,188
31,5	7,5	106,6	11,157	235	1213,33	0,0095	0,08932	1,16685	0,226	0,091	0,046	0,205
31,3	7,5	87,3133	9,139	245	1286,67	0,0095	0,08932	1,16755	0,185	0,097	0,040	0,218
31,5	7,5	29,1067	3,046	250	1200	0,0095	0,08932	1,16685	0,062	0,089	0,012	0,199
31,5	7,5	0	0,000	255	800	0,0095	0,08932	1,16685	0,000	0,051	0,000	0,114

Tabel A12. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$, $y/D = 0,5$ pada *Reynolds Number* $= 17,8 \times 10^4$

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
30,1	9,1	591,913	61,9536	0	0	0,0095	0,08932	1,17175	1,034	0	0	0
30,1	9,1	572,74	59,94679	15	250	0,0095	0,08932	1,17175	1,001	0,0219	0,033	0,0334
30,2	9,1	496,067	51,92164	45	521,333	0,0095	0,08932	1,1714	0,867	0,0444	0,059	0,0677
30,1	9,1	472,78	49,48431	75	678,667	0,0095	0,08932	1,17175	0,826	0,0563	0,071	0,0858
30,2	9,1	429,913	44,9976	105	830	0,0095	0,08932	1,1714	0,751	0,0676	0,077	0,1031
30,1	9,1	388,36	40,64835	135	985	0,0095	0,08932	1,17175	0,679	0,0792	0,082	0,1208
30,1	9,1	379,673	39,73914	165	1026,67	0,0095	0,08932	1,17175	0,663	0,0803	0,081	0,1225
30,1	9,1	360,02	37,68209	205	1128,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,629	0,0861	0,083	0,1312
30,1	9,1	334,453	35,00612	305	1273,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,584	0,0902	0,08	0,1376
30,1	9,1	267,913	28,0416	385	1508,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,468	0,1047	0,075	0,1597
30,1	9,1	198,373	20,76308	405	1535,67	0,0095	0,08932	1,17175	0,347	0,1054	0,056	0,1607
30,1	9,1	128,533	13,45316	425	1593,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,225	0,1089	0,037	0,1661
30,1	9,1	105,56	11,04861	445	1585	0,0095	0,08932	1,17175	0,184	0,1062	0,03	0,162
30,1	9,1	82,8267	8,669191	465	1638,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,145	0,1093	0,024	0,1668
30,1	9,1	81,26	8,505213	495	1710	0,0095	0,08932	1,17175	0,142	0,1132	0,025	0,1727
30,1	9,1	73,2933	7,671369	525	1740	0,0095	0,08932	1,17175	0,128	0,1132	0,022	0,1727
30,1	9,1	70,16	7,343413	555	1778,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,123	0,114	0,021	0,1739
30,1	9,1	41,1467	4,306684	595	1823,33	0,0095	0,08932	1,17175	0,072	0,1145	0,013	0,1746
30,1	9,1	0	0	665	1683,33	0,0095	0,08932	1,17175	0	0,0949	0	0,1447

Tabel A13. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$

V = 5,01 m/s											
Sudut (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average (N.cm)
0	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1	1,5
10	3	2	2	3	1	2	2	2	2	1	2
20	2	3	2	2	1	2	2	2	2	3	2,1
30	2,5	1,8	1,8	1,7	2,8	2,8	2,3	3,1	2,2	2,0	2,3
40	1,7	2,3	2,4	1,8	2,3	2,3	2	1,8	1,6	2	2,02
50	1,4	1,6	1,5	1,7	1,3	1,6	1,4	1,7	1,8	1,5	1,55
60	1,4	1,4	1,2	1,4	1,5	2,3	1,1	1,6	1,6	0,7	1,42
70	0,7	1,2	0,9	1,2	0,7	1,1	1,6	0,9	1,1	1,4	1,08
80	0,9	1	0,6	0,7	0,9	0,5	1,1	0,4	0,3	0,4	0,68
90	0,4	0,3	0,6	0,3	0,7	0,6	0,6	0,8	0,6	0,5	0,54
100	0	0,2	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,06
110	0,3	-0,2	-0,1	0,2	0,1	-0,2	0,3	0,1	0,1	-0,2	0,04
120	0	-0,2	-0,1	0,3	-0,2	0	-0,4	-0,2	0,1	-0,3	-0,1
130	0	0,1	-0,6	0	-0,2	-0,1	0	-0,4	-0,2	-0,2	-0,16
140	-0,8	-0,7	-0,6	-0,7	-1,2	-0,6	0,1	-0,5	-0,7	-0,7	-0,64
150	-0,6	-0,7	-0,1	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8	-1	-0,9	-1,1	-0,73
160	-1	-0,8	-1,4	-0,6	-1,2	-0,8	-0,9	-0,8	0,1	-0,4	-0,78
170	-0,6	0	0,7	0,1	0,8	0,3	0,1	-0,6	0,7	1,6	0,31
180	0,9	1,1	1,4	1,2	1,3	1,2	1,2	0,7	1,5	1	1,15

Tabel A14. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$

V = 7,5 m/s											
Sudut (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average (N.cm)
0	3	2	2	4	6	3	5	4	5	3	3,7
10	6	4	5	6	4	7	4	5	7	5	5,3
20	6	8	4	7	5	5	8	5	6	9	6,3
30	5,5	5,7	6,2	6,3	5,3	7,2	5,4	7,7	9,7	6,6	6,56
40	6,5	6,1	5,2	6,2	4,9	7	5,3	6,6	5,7	5,5	5,9
50	3,1	4,6	4,1	2,9	3,8	3,4	3,9	5	7,4	5,7	4,39
60	4,8	2,7	1,8	3,6	3,4	5,1	3	4,8	4,9	5,1	3,92
70	4,1	4,3	4,8	1,6	4,6	3	4,6	4,2	2,5	4,1	3,78
80	2,1	2,5	2,6	3,5	3,4	3	3,6	2,9	1,6	2,8	2,8
90	1,5	1,6	2	2,4	1,8	0,9	2,1	3,2	2	1,6	1,91
100	0,8	0,7	-0,4	1,2	-0,7	1,4	1,1	1,6	1,2	1,3	0,82
110	0	0,6	-1,2	0	0	0,4	0,5	0,8	1,2	1,1	0,34
120	0,1	1	1,1	0,4	-0,4	1,3	-1,2	-0,5	-0,6	-0,2	0,1
130	0,8	-0,2	-0,2	0	0,1	-2,2	-0,9	0,6	-0,4	-0,9	-0,33
140	-0,2	0,5	-1,2	-2	-0,4	0	-0,8	-2,1	0,4	-1,3	-0,71
150	-0,6	-1,6	-1,7	-1,8	-0,6	-1,6	-2,4	-0,4	-1,8	-3,6	-1,61
160	-1,4	-2	-2,1	-1,7	-2,5	0,5	-1,7	0	-0,7	-1,5	-1,31
170	0,7	-0,1	-0,5	0,3	-2,2	2,1	-0,1	0,5	2	0,6	0,33
180	4	4,1	3,3	3	3,5	3,2	3,2	5,2	3,5	3,5	3,65

Tabel A15. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* = $17,8 \times 10^4$

V = 9,2 m/s											
Sudut (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average (N.cm)
0	3,9	3,5	3,5	4,9	2,6	3,4	2,5	2,6	3,2	2,1	3,22
10	7,6	6,7	7	6,3	7,2	6,5	7,4	7	7,7	6,8	7,02
20	7,2	7,9	8,1	7,6	8,2	7,1	7,4	7,6	7,5	7,7	7,63
30	7,7	7,9	7,2	8,1	8,6	7,5	7,4	8,8	7,6	8	7,88
40	7,2	8	7	6,9	6,5	6,2	8,5	7,7	6,8	7,6	7,24
50	6,8	7,1	7,4	7	7,8	5,9	5,8	5,2	7,5	6,5	6,7
60	5	5,6	4,1	6,3	5,4	5,8	5	8,2	7	5,9	5,83
70	4,4	6,2	3,7	4,1	5,6	5,2	4,2	4,1	3,6	4,8	4,59
80	3	3,2	3,6	3	4,1	3,9	4,4	3,2	4,8	3,5	3,67
90	2,9	2,6	2,6	2,7	3,1	3,3	2,7	4	3,2	3,5	3,06
100	1,5	1,5	2,6	1,5	1,9	1,9	2,2	2,4	1,9	2,9	2,03
110	1,8	1,1	1,9	2,1	2	1,1	1,3	1,5	1,6	1,4	1,58
120	0,9	0,5	0,5	1,6	1,4	0	1,1	1,5	1,4	0,4	0,93
130	0,9	1	1,2	-1,9	-1,1	0,3	0,6	0,3	-0,1	-1,1	0,01
140	-1	0,6	0,2	-3,2	-0,8	-2,2	-2,3	-0,9	-1,3	-1,3	-1,22
150	-3	-2,2	-1,6	-1,3	-2	-1,3	-2,2	-1,9	-2,7	-2,1	-2,03
160	-1,2	0,7	2,3	-1,6	-2,3	2,7	-2,1	2,3	-1	0	-0,02
170	4,6	3,8	-2	3,3	3,8	0,2	4,2	2,9	2,2	-2	2,1
180	4,1	4,5	5,2	5	2,5	-0,8	4,3	4,7	-1,2	5,1	3,34

Tabel A16. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$ pada $y/D = 0,5$ dan *Reynolds number* = $9,7 \times 10^4$

V = 5,01 m/s											
Sudut (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average (N.cm)
0	0,8	0,8	0,9	0,4	0,7	0,7	0,6	0,6	0,9	1,1	0,75
10	1,1	1,2	1,3	1	1	1	1,2	1,1	0,7	0,5	1,01
20	1,3	1,4	1,5	1,5	0	1	0,9	1	1,5	1,3	1,14
30	1,8	2	1,1	1,2	0,4	1,3	1,2	1,7	1,5	0,5	1,27
40	0,6	0,5	0,9	1,6	0,4	1,9	1,5	2	2	1,9	1,33
50	1,5	1,7	2,3	1,8	2	2	1,6	1,9	1,9	2,1	1,88
60	1,9	1,4	1,3	1,7	1,7	2,1	1,2	1,8	1,3	1,3	1,57
70	2	0,5	1,4	1,1	1,8	2	1,3	1,2	1,1	1,3	1,37
80	0,5	1,1	0,9	-0,1	0,6	0,4	0,5	0,3	0,3	1	0,55
90	0,7	0,2	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,37
100	0,1	0,4	0,2	0,6	0,2	0,4	-0,4	0,3	0,4	0,5	0,27
110	-0,1	0,2	0,2	0,2	0	-0,1	0,2	0,4	0,5	0,1	0,16
120	0,2	0,2	0,3	0,1	0	0,1	0	0,2	-0,1	0	0,1
130	0,1	0	0,1	-0,2	0	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0,08
140	0,1	-0,4	0	-0,1	0	0,5	0,5	-0,1	0	0,4	0,09
150	0,5	0,2	0,3	-0,1	0,2	0,1	-0,1	0	-0,1	0	0,1
160	0,5	0	0,1	0,3	0	0	0,3	0,1	0,2	0,1	0,16
170	0,5	0	0,1	0,1	0,2	0,1	0	0,1	0,2	0,4	0,17
180	0	0,3	0	0,2	0	0	0,3	0	0,5	0,2	0,15

Tabel A17. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$ pada $y/D = 0,5$ dan *Reynolds number* = $14,5 \times 10^4$

V = 7,5 m/s											
Sudut (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average (N.cm)
0	2	2,2	2,6	1,2	2,4	2,5	2,6	3	1,3	0,7	2,05
10	2,9	2,7	2,8	3,9	2,5	2,5	3	2,6	1,9	2,4	2,72
20	3	2,1	1,5	2,1	2,6	3,9	4,6	3,5	3,9	3,4	3,06
30	2,5	2,6	3,9	4	2,9	3,5	4,7	3,3	3,9	3,2	3,45
40	3,5	3,9	4	3,2	3,7	4	3,6	3,5	3,8	4	3,72
50	5	5,5	5,6	5,7	4	5,9	5,1	5	4,7	4,6	5,11
60	3,3	4,9	4,3	7,3	4,8	4,2	4,7	4,1	3,9	4,5	4,6
70	3,5	3,5	2,5	2,3	3,2	5,6	4,6	4,8	4,5	1,7	3,62
80	1,6	1,4	2,5	2,4	1,8	2	2,9	1,3	2,7	2,1	2,07
90	0,9	1,5	1,6	1	1,3	1,3	-0,4	1,1	1,3	1,3	1,09
100	1	1,2	-0,8	1,2	0,4	1	1,5	1,1	-0,2	1,3	0,77
110	0,1	0,8	1	0	0,7	0,3	0,4	0,5	1,8	0	0,56
120	1,2	1	0,8	0,1	-1,1	0,2	1,9	-0,4	-0,1	0	0,36
130	0,3	0,2	-0,3	-0,5	0,5	0,6	0,7	0,1	0,2	0,6	0,24
140	0,7	0,1	1	1,1	1,8	0,9	1,5	2,2	0,2	0	0,95
150	1,6	1,4	1,1	0,8	0,9	0,6	1,3	0,8	0,8	1,2	1,05
160	1,1	1,5	1,8	2,5	1,2	0,7	0,9	1,1	1,4	0,7	1,29
170	2,6	1,8	1,9	2,1	1,3	1,2	1,6	0,6	0,4	1,4	1,49
180	1,1	0,7	0,8	2	1,5	1,9	1,7	1,7	1,6	1,6	1,46

Tabel A18. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$, $S/D = 1,4$ pada $y/D = 0,5$ dan $Reynolds\ number = 17,8 \times 10^4$

V = 9,2 m/s											
Sudut (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average (N.cm)
0	4,3	3	3	3,8	4,1	2,3	2,5	4,1	3,1	3	3,32
10	4	4,3	4,2	3,6	4,5	3,6	3,2	4,3	3,3	4,2	3,92
20	5,6	4,7	4	5,7	3,9	3,4	4,8	4,4	6	4,9	4,74
30	4,4	6,6	6,9	6,1	4,6	4,3	4,4	3,4	5,2	5,6	5,15
40	5,8	6,5	7,5	5,9	5	4,8	6,8	6,4	6,6	4,9	6,02
50	6	6,4	8	7,1	7,4	7,3	7,2	8,5	6,7	7,9	7,25
60	5,8	5,8	6,9	8,7	7,6	8,2	7,3	7,6	5,3	8,4	7,16
70	5	5,6	5,8	5	4,6	4,7	5,4	4,9	5,9	6,2	5,31
80	-0,3	3,9	4	3,8	4,7	2,5	-0,8	2,2	1,6	1,7	2,33
90	1,6	1,3	1,4	1,8	1,8	1,6	-0,2	1,6	1,8	0,6	1,33
100	1,9	2,1	1,6	0,6	0,4	0,9	1,7	0,6	0,7	1,1	1,16
110	1,2	0,4	0,6	0,7	0,5	1,1	1,8	1,4	1,9	1,1	1,07
120	0,7	1,3	0,6	0,5	0,7	2,4	1,2	0,7	0,5	1,1	0,97
130	0,4	0,6	0,8	0,5	1,5	1,9	1	0,8	0,7	0,5	0,87
140	0,5	1,2	1,1	1,5	2,3	1	-0,2	1,3	0,5	0,6	0,98
150	1,3	1,6	1,8	1,5	1,4	1,1	1,6	1,3	1,7	2	1,53
160	2,2	2,3	2	0,9	1,3	1,2	1,7	1	1,9	1,7	1,62
170	2	2,8	2,1	2,3	2,5	2,5	2,8	2,2	2	1,9	2,31
180	2,5	1,8	1,9	3,5	2,5	1,9	2,3	3,1	1,7	1,8	2,3

Tabel A19. Data Putaran Turbin Angin Savonius

Re	n tanpa Silinder Pengganggu (rpm)	n/n0		
		y/D = 0	y/D = 0,25	y/D = 0,5
97000	374,567	-	-	1,08
145000	609,2	-	-	-
178000	632,86	-	-	-

Tabel A20. Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius

Re	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu					
	CoP	TSR	y/D = 0		y/D = 0,25		y/D = 0,5	
			CoP/CoP ₀	TSR	CoP/CoP ₀	TSR	CoP/CoP ₀	TSR
97000	0,15	0,91	-	0,69	-	0,62	1,13	0,71
145000	0,13	0,88	-	0,65	-	0,65	-	0,66
178000	0,09	0,61	-	0,57	-	0,52	-	0,63

Tabel A21. Data *Coefficient of Moment* dan *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius

Re	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu					
	Cm	TSR	y/D = 0		y/D = 0,25		y/D = 0,5	
			Cm/Cm ₀	TSR	Cm/Cm ₀	TSR	Cm/Cm ₀	TSR
97000	0,30	0,13	-	0,21	-	0,16	-	0,15
145000	0,23	0,11	-	0,08	-	0,16	-	0,18
178000	0,19	0,08	-	0,09	-	0,08	-	0,07

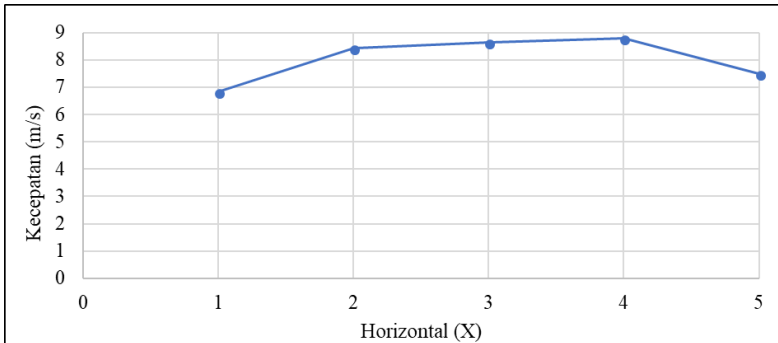
Tabel A22. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius

Sudut (deg)	T tanpa Silinder Pengganggu (N.cm)			T / T ₀		
	Re=97000	Re=145000	Re=178000	y/D =0,5		
				Re=97000	Re=145000	Re=178000
0	1,5	3,7	3,22	-	-	1,03
10	2	5,3	7,02	-	-	-
20	2,1	6,3	7,63	-	-	-
30	2,3	6,56	7,88	-	-	-
40	2,02	5,9	7,24	-	-	-
50	1,55	4,39	6,7	1,21	1,16	1,08
60	1,42	3,92	5,83	1,11	1,17	1,23
70	1,08	3,78	4,59	1,27	-	1,16
80	0,68	2,8	3,67	-	-	-
90	0,54	1,91	3,06	-	-	-
100	0,06	0,82	2,03	4,5	-	-
110	0,04	0,34	1,58	4	1,65	-
120	-0,1	0,1	0,93	-	3,6	1,04
130	-0,16	-0,33	0,01	-	-	-
140	-0,64	-0,71	-1,22	-	-	-
150	-0,73	-1,61	-2,03	-	-	-
160	-0,78	-1,31	-0,02	-	-	-
170	0,31	0,33	2,1	-	4,51	1,1
180	1,15	3,65	3,34	-	-	-

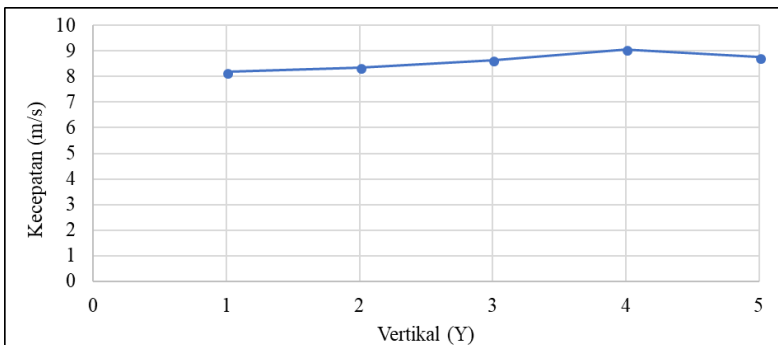
Tabel A23. Data *Uniformity*

Titik	Kecepatan (m/s)	
	Horizontal (X)	Vertikal (Y)
1.	6,82	8,18
2.	8,43	8,36
3.	8,64	8,64
4.	8,78	9,07
5.	7,49	8,76
Rata-rata	8,032	8,602

Vertikal	Horizontal					
		1	2	3	4	5
	A	A1	A2	A3	A4	A5
	B	B1	B2	B3	B4	B5
	C	C1	C2	C3	C4	C5
	D	D1	D2	D3	D4	D5
	E	E1	E2	E3	E4	E5



Gambar A1. Grafik Keseragaman Aliran pada posisi Horizontal (X)



Gambar A2. Grafik Keseragaman Aliran pada posisi Vertikal (Y)

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BIODATA PENULIS



Penulis, Lina ‘Ainun Nafi’ah merupakan anak pertama dari dua bersaudara, yang lahir pada tanggal 16 Juni 1996 di Nganjuk. Penulis memulai pendidikannya di TK Pertiwi Jampes (2001 - 2002). Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri Jampes 1 (2002-2008), SMP Negeri 1 Nganjuk (2008-2011), SMA Negeri 2 Nganjuk (2011-2014). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi negeri, tepatnya di S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2014-2018) melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Undangan. Saat ini, penulis menjadi anggota aktif Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida. Selama perkuliahan, penulis aktif menjadi asisten praktikum mata kuliah Mekanika Fluida Dasar 2 pada Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida pada tahun 2016-2017 hingga 2017-2018. Selain itu, penulis juga menjadi staff aktif Departemen Dalam Negeri (DAGRI) Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri (BEM FTI) pada tahun 2015-2016, staff aktif Badan Keputrian Lembaga Dakwah Jurusan (LDJ) Ash-Shaff Teknik Mesin ITS pada tahun 2015-2016. Pelatihan yang pernah penulis ikuti semasa kuliah adalah Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar (LKMM Pra TD) XII FTI ITS pada tahun 2014, Kursus Dasar-Dasar Otomotif Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin FTI ITS pada tahun 2015, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Dasar (LKMM TD) XXXI Teknik Mesin FTI ITS pada tahun 2015, *Leadership and Organizing Training* (LOT)

BEM FTI-ITS pada tahun 2015, dan Pelatihan Teknologi Informasi Jurnalistik BEM FTI ITS pada tahun 2015. Apabila terdapat kritik dan saran, dapat menghubungi penulis melalui email nafiah.linaainun96@gmail.com.